



Bygningsintegreret varmelagring af solvarme i terrændæk

Weitzmann, Peter; Holck, Ole; Svendsen, Svend

Publication date:
2001

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Weitzmann, P., Holck, O., & Svendsen, S. (2001). *Bygningsintegreret varmelagring af solvarme i terrændæk*. Byg Rapport No. R-006 <http://www.byg.dtu.dk/publications/rapporter/byg-r006.pdf>

General rights

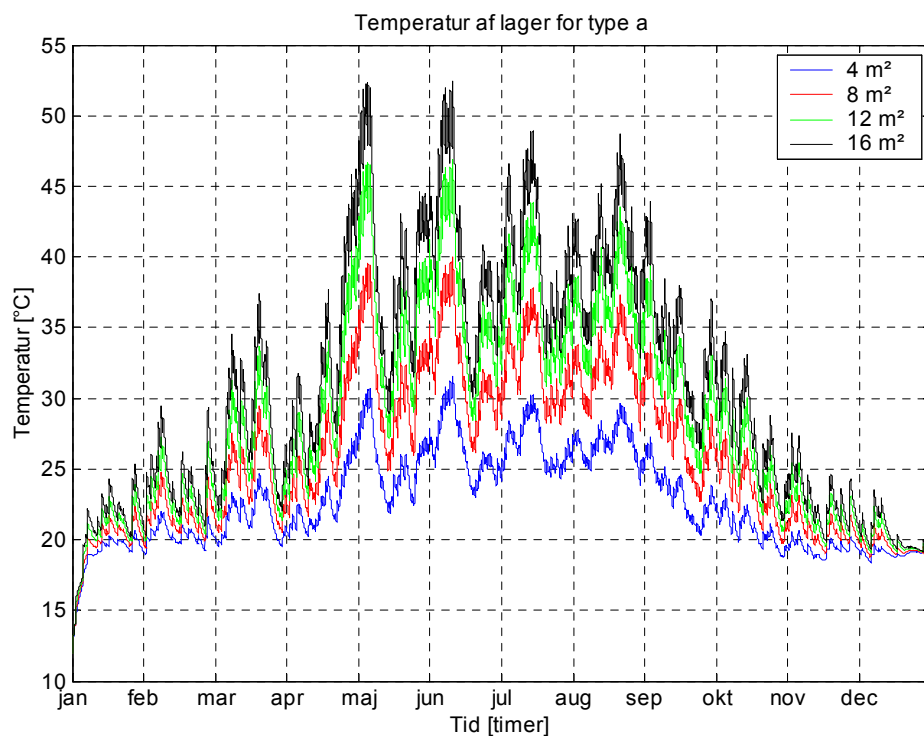
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Peter Weitzmann
Ole Holck
Svend Svendsen

Bygningsintegreret varmelagring af solvarme i terrændæk



Rapport
BYG·DTU R-006
2001

ISSN 1601-2917
ISBN 87-7877-061-0

Forord

Ved ansøgning til Energistyrelsen er der opnået finansiering af projektet ”Bygningsintegreret varmelagring af solvarme i terrændæk”; Energistyrelsens jr. nr. 51181/99-0039.

Projektet omhandler varmelagring og udnyttelse af opsamlet solvarme i et varmelager i bygningens terrændæk. Varmelageret består af et beton- eller sanddæk, der er isoleret både opad og nedad. I nærværende rapport er resultaterne fra beregninger sammenfattet og er blevet kvalitetssikret af Klaus Ellehauge fra Teknologisk Institut i Århus.

En del af projektet omhandler en detaljeret modellering af varmelageret og tilhørende gulvvarmesystem, samt interaktionen med den øvrige bygning. Modelopbygningen af systemet er beskrevet i denne rapport.

I modellen er der foretaget detaljerede beregninger af temperaturforholdene i gulvet, og herunder også varmelageret. Varmetab til jord og mod fundament er foretaget i henhold til DS418 tillæg 4.

Den opbyggede model består af hus, gulv med varmelager, soltank og solfanger. Modelleringen er foretaget i programpakken bestående af Matlab og Simulink. Modellen er opbygget som en simpel RC-model, opbygget på baggrund af beregninger i finite element programmet Femlab, der er en integreret del af Matlab programpakken. Ved sammenligninger mellem de finite element metoden og RC-modellen, er der fundet en god overensstemmelse mellem de to metoder, og dermed anses RC-modellen som god nok til at repræsentere de forhold, der er i gulvet hvad angår temperaturer og varme-strømme.

Den opbyggede forenklede RC-model kan benyttes til at foretage årssimuleringer, hvilket er alt for tidskrævende, hvis der skulle benyttes finite element beregninger af temperaturforholdene i gulvet.

Projektet er udført på BYG·DTU af Peter Weitzmann, Ole Holck og Svend Svendsen

Resumé

I denne rapport undersøges de energimæssige og termiske forhold omkring varmelagring af solvarme i terrændæk udført med to tunge dæk hvoraf det nedre kan bruges som varmelager.

Det er formålet med det arbejde der er gennemført, at kunne angive de muligheder der er for at nedsætte opvarmningsbehovet i et hus, ved at benytte denne form for udnyttelse af solvarme.

Rapporten indledes med en introduktion til den problemstilling der ønskes undersøgt – nemlig at der skal foretages detaljerede beregninger af temperatur- og varmestrømsforhold i terrændækket i huset.

I kapitel 2 beskrives den teori der danner grundlag for modelopbygningen af solfanger, soltank, terrændæk, fundament og styring. Den opbyggede model implementeres i programpakken der indeholder Matlab og Simulink.

Især opbygningen af modellen for terrændækket beskrives i detaljer i afsnit 2.3. Afsnittet indledes med beskrives af konstruktionen, og det beskrives hvordan der opbygges en detaljeret finite element metode samt en mindre detaljeret RC-model, hvor temperaturen i konstruktionen kun beregnes i nogle få knuder, hvortil der er knyttet varmekapacitet. Mellem knuderne er der indbygget en varmemodstand. Det viste sig nødvendigt at benytte RC-modellen til årssimuleringer, idet beregningstiden ellers ville blive uacceptabel lang. I stedet vises hvorledes resultater fra finite element metoden kan benyttes, til at bestemme de koefficienter der indgår i RC-modellen. De to modeller sammenlignes, for at kunne finde størrelsen af den fejl der introduceres, ved at benytte den mindre detaljerede model. Afvigelsen mellem de to modeller er på under 5 %.

I afsnit 2.3.7 angives de koefficienter der findes til RC-modellen for syv forskellige opbygninger af terrændækskonstruktionen med hensyn til rørafstand, fordeling af isolering, lagertykkelse og type (sand eller beton).

I afsnit 2.5 angives forskellige muligheder for at styre væskeflowet mellem soltank og varmelager.

I kapitel 3 beskrives den opbyggede model med hensyn til opbygning af huset. Der implementeres to modeller af huset. En model der opfylder kravene til det nuværende bygningsreglement, og en model der opfylder kravene til det kommende.

I kapitel 4 beskrives de resultater der opnås ved simuleringer i den opbyggede model. Først angives forudsætningerne i afsnit 4.1, og i afsnit 4.2 angives resultaterne.

I resultatafsnittet er der beregninger af husets opvarmningsbehov, reduktion af opvarmningsbehov som følge af varmelagring i terrændækket. For brugsvandsdelen angives anlæggets nettoydelse og dækningsgraden. Resultaterne angives for de syv forskellige opbygninger af terrændækskonstruktionen ved forskellige solfangerarealer. Styringens indflydelse på resultaterne antydes også her.

I kapitel 5 angives der en række dimensioneringsdiagrammer baseret på resultaterne fra de parametervariationer der er opbygget.

I kapitel 6 vurderes økonomien i at opføre et projekt som dette.

Til slut er der i kapitel 7 foretaget en diskussion af de resultater der er opnået, og det beskrives hvilke muligheder der vil være for at videreføre projektet.

Summary

In this report the thermal properties of heat storage of solar heating in floors is examined. The floor examined is built using two decks, where the lower can be used for heat storage.

It is the purpose of the work that has been carried out, to be able to quantify the potential for a reduction of the heating demand in a house, through the use of heat storage of solar heating.

The report starts out with an introduction to the problem that is to be examined, namely to perform detailed calculations of the temperature and heat flows in floors.

In chapter 2 a description of the theory for the implementation of the model for solar collector, solar tank, floor, foundation and control strategies, can be found. The model described here has been implemented into the programming language Matlab and Simulink.

Especially the model of the floor is described in great detail in section 2.3. The section begins with a description of the floor construction. It is then described how the floor construction is implemented into a detailed finite element model, and converted into a less detailed RC-model, where the temperature is calculated only in a few points. Each of the points has a heat capacity, and between the points a thermal resistance is included. The reason for using a RC-model is, that it proved impossible to do yearly calculations using the finite element model because of unacceptably long calculation times. Instead the procedure for the conversion between the two models is shown. After the conversion results from the two methods are compared to estimate the error introduced by this conversion to a less detailed model. The two methods are found to differ only by around 5 %.

In section 2.3.7 the coefficients to be used in the RC-model are shown for seven different layouts of the floor concerning pipe spacing, distribution of insulation, thickness of heat storage layer and type of heat storage layer (sand or concrete). In section 2.5 a number of different control strategies for the distribution of flow in solar tank and heat storage layer are described.

In chapter 3 the model of the house used for calculations is described. Two different versions are used. One that is built according to the present day Danish Building Code, and one built according to the forthcoming Danish Building Code.

In chapter 4 the results from the simulations are shown. In section 4.1 the foundation for the calculations are given, and in section 4.2 the results are listed. The results include calculations of the heating demand of the house, the reduction of the heating demand as a consequence of the heat storage in the floor. For the supply of hot water the system's net gain is shown, and the percentage of the hot water supplied by the solar collector. The results are shown for the different layouts of the floor. The influence of the control system is also briefly discussed.

In chapter 5 a number of dimensioning diagrams are shown. These are based on the results from the parametrical analysis.

In chapter 6 the price and pay back time of heat storage in a floor is examined.

Finally in chapter 7 the results obtained in the project are discussed, and the possibility for a continuation of the project is also discussed.

Indholdsfortegnelse

FORORD	1
RESUMÉ	2
SUMMARY	3
INDHOLDSFORTEGNELSE	4
1 INTRODUKTION	6
1.1 SYSTEMOPBYGNING	6
1.2 BAGGRUND	7
2 MODELOPBYGNING.....	8
2.1 SOLFANGERKREDSSEN	8
2.1.1 SOLFANGERENS PRODUKTION	8
2.1.2 FLOWSTYRING I SOLFANGERKREDSSEN	10
2.1.3 RØRSTRÆKNINGEN	10
2.2 VARMTVANDSBEHOLDER/SOLTANK	10
2.3 TERRÆNDÆK.....	13
2.3.1 OPBYGNING AF TERRÆNDÆK	13
2.3.2 FINITE ELEMENT MODEL (FEMLAB)	15
2.3.3 RC-MODEL (SIMULINK)	15
2.3.4 BESTEMMELSE AF VÆSKETEMPERATUR	17
2.3.5 KONVERTERING FRA FINITE ELEMENT MODEL TIL RC MODEL	18
2.3.6 SAMMENLIGNING AF BEREGNINGSRESULTATER	22
2.3.7 PARAMETRE TIL INPUT I RC-MODEL	25
2.4 FUNDAMENT	26
2.4.1 BEREGNING AF LINIEKULDEBRO	26
2.4.2 LINIEKULDEBRO I RC-MODEL	28
2.4.3 VÆRDIER AF LINIEKULDEBROEN	28
2.4.4 VARMETAB MOD JORD	29
2.5 STYRING	29
2.5.1 GULVVARMEKREDSSEN	29
2.5.2 SOLFANGERKREDSSEN	29
2.5.3 EKSEMPLER PÅ ØVRIGE STYRINGSMULIGHEDER I TERRÆNDÆK	32
2.6 RUMMODEL	33
3 IMPLEMENTERING	35
3.1 SOLFANGER	35
3.2 SOLTANK	35

3.3 HUS	35
3.3.1 SAMLET VURDERING AF HUSETS ENERGIMÆSSIGE FORHOLD.....	37
3.4 STYRING	37
3.4.1 SOLFANGERKREDS	37
3.4.2 GULVVARMEKREDS	37
 4 RESULTATER	 39
 4.1 FORUDSÆTNINGER.....	 39
4.2 RESULTATANALYSE	39
4.2.1 SOLTANK	40
4.2.2 LAGER	43
4.2.3 PARALLELSTYRING.....	52
4.2.4 SERIELSTYRING	53
 5 DIMENSIONERINGSDIAGRAMMER	 55
5.1.1 ISOLERINGSTYKKELSEN MELLEM LAGER OG GULVVARMEDÆK.....	55
5.1.2 LAGERTYKKELSE	56
5.1.3 RØRAFSTAND.....	57
5.1.4 LAGERTYPE	57
 6 ØKONOMI.....	 58
6.1 FORUDSÆTNINGER.....	58
6.2 ANALYSER	58
 7 DISKUSSION OG KONKLUSION.....	 62
7.1 OPBYGNING AF MODEL	62
7.2 OVERORDNEDE RESULTATER	62
7.3 SAMMENLIGNING MED ØVRIGE UNDERSØGELSER	63
7.4 LAGEROPBYGNING	64
7.5 STYRING	65
7.6 KOMFORTVARME	65
7.7 ØKONOMI	66
7.8 FORSLAG TIL ANDRE ANLÆGSOPBYGNINGER	66
7.9 KONKLUSION	67
 8 LITTERATUR.....	 68

1 Introduktion

I forbindelse med tidligere arbejde udført ved DTU, har der vist sig lovende muligheder for nedbringelse af bygningers opvarmningsbehov, ved installation af et solvarmeanlæg kombineret med lagring af solvarme i bygningers terrændæk. [Bommersholdt og Holst]. Derudover er der i [Heller], i et projekt der ligeledes er udført ved DTU, foretaget undersøgelser af bygningsintegrerede sandlagre, som også viser et potentiale for nedbringelse af opvarmningsbehovet.

1.1 Systemopbygning

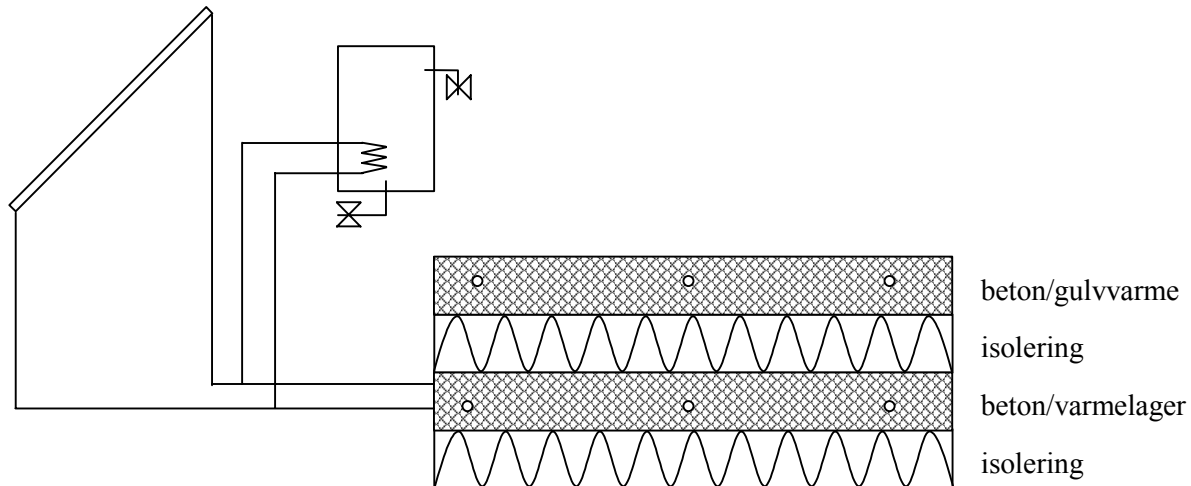
Varmelageret tænkes integreret i terrændækket, ved indstøbning af et ekstra betonlag i terrændækskonstruktionen. Varmelageret isoleres mod både jord og gulv, og der indstøbes slanger i betonlaget, en teknik der er kendt fra gulvvarmesystemer.

Terrændækket opbygges med øverste lag bestående af et betonlag og et nedre lag bestående af enten beton eller sand, begge med indlagte slanger til gulvvarme.

I rapporten fokuseres på et varmelager der dækker hele husets grundplan. Dette giver et stort varmelager, men vil samtidig formindske varmetabet fra gulvvarmeslangerne i hele husets grundplan. Derudover vil et stort lager give ensartede temperaturforhold i hele huset, og der opstår ikke risiko for at et lager under dele af huset vil give en så høj temperatur så det giver komfortproblemer i huset på grund af for høj gulvoverfladetemperatur.

Ved at kunne afsætte varme i varmelager, gives mulighed for en effektiv udnyttelse af den opsamlede solenergi til opvarmning. Solvarme produceret i solskinstimer med typisk lavt eller intet opvarmningsbehov oplagres i varmelageret. Solvarme overført til varmelageret kan anvendes til at dække et senere forekommende opvarmningsbehov, eller nedbringe varmetabet gennem terrændækket.

Nedenstående principtegning figur 1.1 viser et system til bygningsintegreret varmelagring af solvarme i terrændæk. Til venstre ses solfanger, til højre ses et lodret snit i terrændækskonstruktionen med oppefra; betonlag med slanger for gulvvarme, isolering, beton- eller sandlag til varmelagring med indstøbte slanger, isolering mod jord. Det sidste element der indgår på figuren er en soltank/varmtvandsbeholder. Principskitsen er vist med én af de mulige sammenkoblinger der undersøges i rapporten. I dette tilfælde er soltank og gulv parallelkoblet. En anden mulighed er en serielkobling



Figur 1.1 Systemopbygning

Der benyttes i modellen for så vidt muligt standardkomponenter, der i videst muligt omfang dækker det danske marked. Som solfanger anvendes en gennemsnitssolfanger, der således beregningsmæssigt ikke har indflydelse på de opnåede resultater, forstået på den måde, at en udskiftning af solfangeren ikke væsentligt vil ændre på konklusionerne. Som soltank benyttes ligeledes en model der er repræsentativ for markedet.

Gulvet er opbygget af beton, isoleringsmateriale og eventuelt sand. Som isoleringsmateriale benyttes der et opskummet materiale. Igen standardbyggematerialer.

I rapporten beskrives hvorledes denne model opbygges og implementeres i Matlab og Simulink [MathWorks], og kobles sammen med en bygningsmodel, der er opbygget på DTU [Noyé], ligeledes ved hjælp Matlab og Simulink.

1.2 Baggrund

Som ovenfor beskrevet er idéen med dette projekt opstået i forbindelse med et studenterprojekt, der viste, at der var et potentiale for reduktion af opvarmningsbehovet ved at benytte terrændækket som varmelager af solvarme. [Bommersholdt & Holst]. I rapporten findes et potentiale på op til 130 kWh/m² solfanger for et hus med et årligt opvarmningsbehov på omkring 4000 kWh.

I en række øvrige tidligere undersøgelser er varmelagring af solvarme i enten sandlager eller i vand undersøgt.

I [Ellehauge] er det i et arbejde udført på Teknologisk Institut fundet, at den ideelle størrelse af et varmelager skal have en størrelse svarende til 50-100 liter vand pr. m² solfanger. I undersøgelsen er der taget udgangspunkt i en aktiv overførsel af varme til og fra lageret. I denne rapport kigges der kun på passiv varmeafgivelse fra lageret.

Desuden er der ved BYG-DTU det tidligere IBE (Institut for Bygninger og Energi) på DTU blevet udført en del arbejde om varmelagring i terrændæk. Her er der som udgangspunkt udført et meget stort lager. I [Heller] er der lavet en undersøgelse af et sandlager der lige som i denne undersøgelse er udlagt i hele husets grundplan. Her konkluderes det, at der ikke kan hentes nævneværdige aktive bidrag fra sandlageret. Ved aktive forstås at hente varmen op i gulvvarmekredsen fra lageret ved hjælp af væsken i de to systemer. Der er dog fundet et potentiale for reduktion på omkring 2300 kWh i et hus med et årligt opvarmningsbehov på 6000 kWh ved et solfangerareal på 18 m².

2 Modelopbygning

Modelleringen af et system til bygningsintegreret varmelagring af solvarme i terrændæk kan i sine hovedbestanddele opdeles i henholdsvis solfangerkreds og terrændæk. Disse udveksler energi via en eller to lukkede væskedredse. Benyttes der to kredse, fx hvis der benyttes forskellige væsker i de to kredse (vand og glykol), er det nødvendigt endvidere at benytte en varmeveksler. Ud over varmelagringen i terrændækket benyttes varmen fra solfangeren til at opvarme brugsvand. Der er derfor også opbygget en varmtvandsbeholder/soltank, idet de dynamiske forhold i gulvet også afhænger af forholdene i soltanken.

2.1 Solfangerkredsen

2.1.1 Solfangerens produktion

Solfangerens modelleres ud fra kendskab til den såkaldte effektivitetsligning for solfanger, som er beskrevet i [Rahbek og Svendsen], og er givet ved ligning (2.1):

$$C \cdot A \frac{dT}{dt} = A \cdot G \cdot \eta + \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{f,s,ind} - T_{f,s,ud}) \quad (2.1)$$

I ligning (2.1) indgår:

C	Solfangerens effektive varmekapacitet	[J/K m ²]
A	Solfangerens areal	[m ²]
G	Bestrålingsstyrke	[W/m ²]
η	Effektivitet	[-]
\dot{m}	Masseflow	[kg/s]
c_p	Specifik varmekapacitet af væsken	[J/kg K]
$T_{f,s,ind}$	Væsketemperatur til solfanger	[K]
$T_{f,s,ud}$	Væsketemperatur fra solfanger	[K]

Venstre side af ligning (2.1) beskriver solfangerens ændring i indre energi over tiden. Første led på højre side angiver den tilførte effekt til solfangeren, mens andet led er energitransporten som følge af væskestrøm i solfangeren. Temperaturen, T , i ligning (2.1), svarer til udløbstemperaturen fra solfangeren når der er flow i anlægget og til middeltemperaturen når der ikke er flow, og findes ved løsning af differentialligningen.

De indgående størrelser i ligning (2.1), solfangerens effektive varmekapacitet, areal, og masseflow, findes ud fra kendskab til den anvendte solfanger samt det opbyggede anlæg. Data hertil findes i solfangerens datablad.

Solindstrålingen på solfangerfladen bestemmes ud fra solfangerens orientering og hældning, ved brug af programmet Soldia [Soldia], der er udviklet på DTU. På basis af et reference-vejrdataår (DRY), kan Soldia udregne timeværdier for solindstrålingen på en vilkårlig flade, opdelt i solstrålingens enkeltkomponenter, direkte, diffus og diffus reflekteret stråling.

Effektiviteten η udregnes ved nedenstående udtryk fra [Rahbek og Svendsen]:

$$\eta = \eta_0 k_g k_f - \frac{k_0 k_s k_f (T_{f,s,m} - T_a)}{G} - \frac{k_1 k_s k_f (T_{f,s,m} - T_a)^2}{G} \quad [-] \quad (2.2)$$

Hvori:

$$k_s = s_0 + s_1 \cdot S \quad [-] \quad (2.3)$$

$$G = G_{dir} + G_{dif} \quad [-] \quad (2.4)$$

$$k_g = \frac{(k_v(V) \cdot G_{dir} + k_v(60) \cdot G_{dif})}{G} \quad [-] \quad (2.5)$$

Samt:

$$k_v(v) = 1 - \tan^a(V/2) \quad [-] \quad (2.6)$$

I ligningerne (2.2) til (2.6) indgår:

η	Effektivitet	$[-]$
η_0	Starteffektivitet	$[-]$
k_g	Korrektionsfaktor for indfaldsvinkel	$[-]$
k_0	Konstant i standardeffektivitetsudtrykket	$[W/K \cdot m^2]$
k_1	Konstant i standardeffektivitetsudtrykket	$[W/K^2 \cdot m^2]$
k_s	Korrektion for solfangerhældning	$[-]$
s_0	Hældningskorrektionsfaktor	$[-]$
s_1	Hældningskorrektionsfaktor af 1. grad	$[1/^\circ]$
S	Solfangerhældning fra vandret	$[\circ]$
$T_{f,s,m}$	Temperatur i solfanger	$[K]$
T_a	Lufttemperatur	$[K]$
G	Total indfalden solstråling	$[W/m^2]$
G_{dir}	Direkte indfalden solstråling	$[W/m^2]$
G_{dif}	Diffus indfalden solstråling (diffus og diffus reflekteret)	$[W/m^2]$
k_f	Korrektionsfaktor for masseflow (typisk 1)	$[-]$

Til bestemmelse af solfangerens effektivitet skal middeltemperatur, $T_{f,s,m}$, benyttes. Fra ligning (2.1) kendes udløbstemperaturen fra solfangeren. Når der er flow i solfangerkredsen kan middeltemperaturen af solfangeren dermed bestemmes som middelværdien af indløbs- og udløbstemperatur som,

$$T_{f,s,m} = \frac{T_{f,s,ind} + T_{f,s,ud}}{2} \quad [K] \quad (2.7)$$

I ligning (2.7) indgår:

$T_{f,s,ind}$	Væsketemperatur ind i solfanger	$[K]$
$T_{f,s,ud}$	Væsketemperatur ud af solfanger	$[K]$

Når der ikke er flow i solfangerkredsen benyttes den beregnede temperatur fra ligning (2.1) som middeltemperatur i solfangeren, idet det ikke giver mening at benytte fremløbsvæsketemperaturen til solfangeren.

2.1.2 Flowstyring i solfangerkredsen

Væskeflowet i solfangeren styres ud fra temperaturdifferensen mellem udstømmende og indstrømmende væske i solfangeren, og findes som

$$\Delta T_{f,s} = T_{f,s,ind} - T_{f,s,ud} \quad [\text{K}] \quad (2.8)$$

Temperaturen af væsken, ved udløbet af solfangeren, $T_{f,s,ud}$, beregnes af ligning (2.1), mens fremløbstemperaturen til solfangeren, $T_{f,s,ind}$, baseres på udstømningstemperaturen af væsken fra terrændækket og/eller soltanken.

$$T_{f,s,ind} = f(T_{f,t,ud}, T_{f,b,ud}) \quad [\text{K}] \quad (2.9)$$

Temperaturen ud fra terrændækket, $T_{f,t,ud}$, bestemmes i afsnit 2.3.3, og temperaturen i udløbet fra soltanken, $T_{f,b,ud}$, findes i afsnit 2.2. I afsnit 3.4 beskrives de forskellige styringsstrategier der anvendes i simuleringerne.

Grundet den lave temperatur og varmekapaciteten af den indstrømmende væske i solfangeren, vil den beregnede udløbstemperatur falde umiddelbart efter flowet i solfangeren idriftsættes. Det er derfor nødvendigt, at anvende separate kriterier, for henholdsvis idriftsættelse ($\Delta T_{f,s,start}$) og afbrydelse ($\Delta T_{f,s,stop}$) af væskeflowet i solfangeren, hvor:

$$0 \leq \Delta T_{f,s,stop} < \Delta T_{f,s,start} \quad [\text{K}] \quad (2.10)$$

Her findes temperaturdifferensen mellem ind- og udløb i ligning (2.8).

Som et sidste krav benyttes der følgende kriterium for at der kan være flow i solfangerkredsen:

$$G_{tot,solfanger} \geq 50 \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (2.11)$$

Altså skal indstrålingen på solfangerfladen være mindst $50 \text{ W}/\text{m}^2$ for at der tændes for flowet i kredsen. Dette er ikke en normalt benyttet fremgangsmåde for små solvarmeanlæg (på grund af forøgede nødvendige investeringer i solvarmeanlægget i form af et solarimeter), men det benyttes her, for at undgå, at simuleringssmodellen stopper, på grund af nogle tilbagekoblinger i modellen der på dette punkt kan virke uhensigtsmæssige.

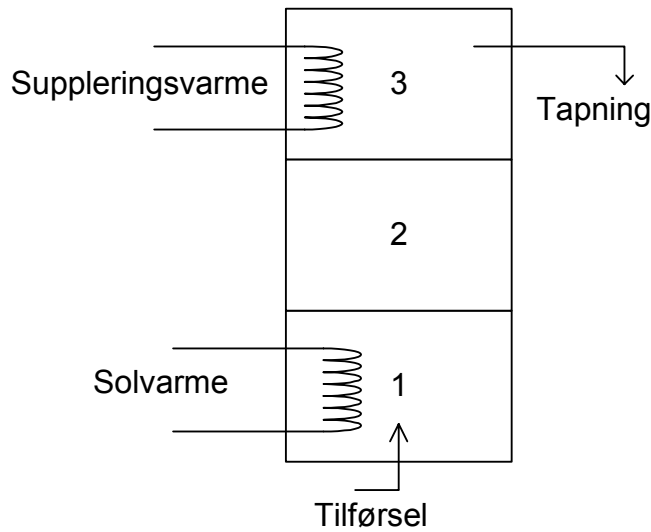
2.1.3 Rørstrækningen

Grundet en eventuel varmeveksling, samt varmetab fra rørstrækningen mellem terrændæk/soltank og solfanger, kan der indregnes et temperaturfald af væsken i rørstrækningen. Da de indgående temperaturdifferenser er små, kan varmetabet fra rørstrækningen dog som hovedregel antages at være af mindre betydning, og størrelsen negligeres.

2.2 Varmtvandsbeholder/soltank

Varmtvandsbeholderen opbygges på baggrund af den teori der er beskrevet i [Furbo] og til dels [Rahbek og Svendsen] samt [Dutr  ]. Den beskrives her kort. Der betragtes her udelukkende varmtvandsbeholdere med indbygget spiral, og således medtages k  ppebeholdere ikke.

Grundlæggende benyttes der en model bestående af tre knuder. Modellen er skitseret i nedenstående figur 2.1.



Figur 2.1 Model af soltank

Soltanken er, som det kan ses af figuren opbygget i tre lag, der hver især udgør en tredjedel af tankens volumen. Hver af de tre lag repræsenteres af én knude, med én temperatur tilknyttet. Der ses altså bort fra temperaturvariationen i hver enkelt knude.

I den nederste knude tilføres varmen fra solfangeren og der tilføres brugsvand til tanken, og derudover er der varmetab til omgivelserne og varmeudveksling med den midterste del af tanken. Denne varmeudveksling sker både ved varmeledning gennem soltankens vægge og væske, samt ved væskebevægelser i tanken.

I den midterste knude er der varmetab til omgivelserne, samt varmeudveksling opad og nedad.

I den øverste knude tappes det varme vand fra anlægget, og der tilføres varme fra den sekundære varmekilde til opvarmning af det varme vand, så det når op på setpunkttemperaturen. Igen sker der en udveksling af varme med den midterste knude. Den sekundære varmekilde er her antaget at være enten en elpatron eller en varmespiral fra fx oliefyr eller gasfyr.

Ligningerne for de tre knudepunkter er som følger:

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = Q_{sol} + Q_{v/2,1} - Q_{vv,1} - Q_{tab,1} \quad (2.12)$$

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = Q_{v/3,2} - Q_{v/2,1} - Q_{vv,2} - Q_{tab,2} \quad (2.13)$$

$$C_3 \frac{dT_3}{dt} = Q_{suppl} - Q_{v/3,2} - Q_{vv,3} - Q_{tab,2} \quad (2.14)$$

Herunder beskrives de enkelte varmetilskud eller varmetab som indgår i ligning (2.12) til (2.14). Temperaturerne T_1 , T_2 og T_3 henviser til temperaturen i de tre knuder, og tilsvarende gælder for varmekapaciteten, kaldet C .

Varmetilførslen fra solfangerkredsen bestemmes ud fra:

$$Q_{sol} = UA \cdot (T_{middel} - T_1) \quad (2.15)$$

Her er T_{middel} gennemsnitstemperaturen af væsken i spiralvarmeveksleren, mens UA er varmeoverføringskoefficientensom findes ud fra en følgende ligningssæt:

$$\begin{aligned} UA &= A + B \cdot T_1 \quad [\text{W/K}] \\ A &= K_1 + K_2 \cdot \ln(T_{frem} - T_1) \\ B &= K_3 + K_4 \cdot \ln(T_{frem} - T_1) \end{aligned} \quad (2.16)$$

Her er størrelserne K_1 til K_4 konstanter der bestemmes ud fra spiralens udformning, solfangervæsken og volumenstrømmen i spiralen. Størrelserne findes i programmet Veksler [Veksler], hvor inputdata til modellen findes ud fra prøvningsrapporter for soltanken.

Temperaturen af væsken i solfangerkredsen i returen til solfangeren findes ud fra følgende udtryk

$$\rho_f c_{p,f} V \cdot \frac{dT_f}{dt} = \dot{m} c_{p,f} \cdot (T_{f,ind} - T_{f,ud}) - UA \Delta T_{middel-lager} \quad (2.17)$$

Middeltemperaturdifferencen mellem væsken i spiralen og lageret findes ud fra:

$$\Delta T_{middel-lager} = \frac{1}{2} (\Delta T_{indløb} + \Delta T_{udløb}) \quad (2.18)$$

Her er fx $\Delta T_{indløb} = T_{frem} - T_{lager}$.

Varmeudvekslingen fra én knude til en anden ved varmeledning findes ud fra

$$Q_{vl\ i,i-1} = \frac{L_{i,i-1}}{h_i} (T_i - T_{i-1}) \quad (2.19)$$

Her er $L_{i,i-1}$ den arealvægtede varmeledningsevne af væsken i soltanken og tankens vægge, og h er højden af de enkelte knuder i modellen.

Det skal her nævnes, at der rent numerisk kan opstå det problem, at temperaturen i det midterste lag kan blive lavere end i det nederste lag, hvilket selvfølgelig ikke er fysisk muligt på grund af konvektion af væsken i soltanken. For at undgå dette fænomen gøres der det, at der i beregningerne benyttes en meget stor værdi af $L_{i,i-1}$ hvis temperaturen i et nedre lag er større end i et ovenfor liggende.

Varmeudvekslingen fra én knude til en anden ved strømning i tanken findes ud fra følgende ligninger, hvor det nedre lag er specielt, idet temperaturen af det kolde brugsvand skal inkluderes.

$$Q_{vv,l} = \dot{m}_v C_p (T_l - T_k) \quad (2.20)$$

Her er endvidere \dot{m}_v den tappede mængde varmt brugsvand. For de øvrige lag er,

$$Q_{vv,i} = \dot{m}_v C_p (T_i - T_{i-1}) \quad (2.21)$$

Endelig er varmetabet fra de enkelte knuder til omgivelserne fundet ved

$$Q_{tab,i} = k_i \cdot (T_i - T_{omgivelser}) \quad (2.22)$$

Her er k_i varmetabskoefficienten af soltanken. Værdien kan typisk findes/beregnes ud fra databladet fra soltankens prøvningsrapport.

2.3 Terrændæk

I dette afsnit beskrives den metodologi der benyttes til modellering af terrændækket. Der indledes med at den principielle opbygning af modellen beskrives, og de antagelser der er nødvendige for at modellen kan opbygges, nævnes.

Modellen for gulvet opbygges efter to forskellige principper. Dels som en meget detaljeret model opbygget efter en finite element metode (FEM), hvor alle de varmetekniske forhold i gulvet modelleres korrekt. Det har dog vist sig, at denne model er for beregningskrævende, og der opbygges derfor endvidere en simplificeret model af gulvet, i en såkaldt RC-model baseret på resultater fra finite element beregninger, der langt hurtigere, men ikke så detaljeret. De to metoder sammenlignes derfor, for at undersøge den fejl der bliver introduceret ved konverteringen mellem de to modeller. Begge de to modelleringsteknikker beskrives nedenfor.

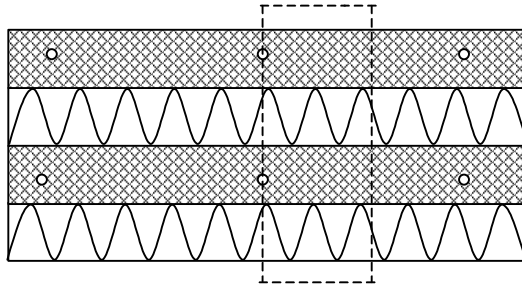
Hvis der ønskes årssimuleringer vil beregningstiden med en finite element metode umuliggøre parametervariationer, idet blot én beregning varer flere dage i modsætning til de ca. 6 timer det tager med en RC-model. Der benyttes til beregningerne en Pentium III på 800 MHz.

Samtidig det viste sig, at der var god overensstemmelse mellem den meget detaljerede finite element model og RC-modellen, hvilket beskrives i afsnit 2.3.6. Den opbyggede model der benyttes til årssimuleringer, er altså en relativt simpel model, der dog er underbygget af, og sammenlignet med, en meget detaljeret finite element model. Hermed antages det, at resultaterne er af samme kvalitetsniveau, som en finite element model ville give.

I afsnit 2.4 beskrives, hvorledes beregningen af fundamentstabt, i form af en liniekuldebrot, foretages og indbygges i beregningerne.

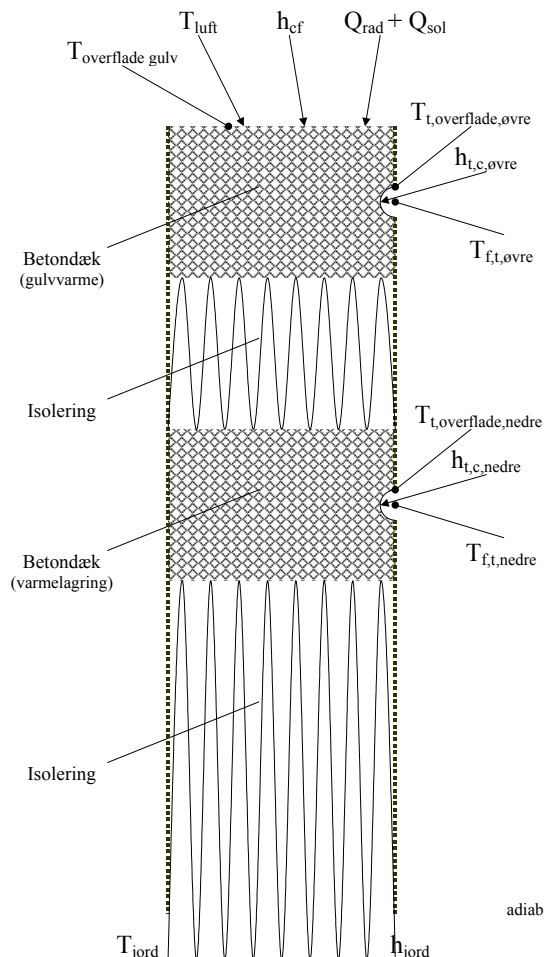
2.3.1 Opbygning af terrændæk

Terrændækket med varmelagring opbygges som et traditionelt betondæk isoleret mod jord, dog tilføjet et ekstra betonlag/sandlager til varmelagring af energi fra solfangeren og et ekstra lag isolering til adskillelse af de to betondæk. I terrændækket er der indstøbt slanger til henholdsvis gulvvarme i øverste dæk, samt tilsvarende til varmeakkumulering i nederste dæk. Disse benævnes senere gulvvarmedæk og lagringsdæk for henholdsvis øverste og nederste dæk. På figur 2.2 vises et lodret snit i gulvet.



Figur 2.2 Lodret snit i gulv med angivelse af beregningstværsnit

For at simplificere beregningerne mest muligt, modelleres gulvet i det mindste mulige kontrolvolumen der kan laves ud fra termiske symmetriakser. Det betyder at der laves et snit på langs af rørene, der dækker en halv rørafstand. Udsnittet der er vist på figur 2.3 viser en principtegning af gulvkonstruktionen med de indgående randbetingelser, som modellen påtrykkes. Den valgte fremgangsmåde giver altså en middelværdi for temperaturforholdene i hele gulvet, og beregningerne kan således ikke bruges til at vurdere forskellen i overfladetemperaturen som følge af udlægningsprincip af slangerne.



Figur 2.3 Terrændækkets opbygning med to dæk, her vist som betondæk

Terrændækket med varmeakkumulering og varmetransport modelleres dels ved en detaljeret finite element metode, og dels ved en grovere RC-metode. RC-metoden er opbygget af få knudepunkter der hver er tilknyttet varmekapacitet (C), hvorimellem der er

termiske modstande (R). Metoden beskrives i afsnit 2.3.3 nedenfor med udgangspunkt i den opbyggede gulvmodel.

Modellen af terrændækket opbygges som en todimensional model afgrænset af det mindste vandrette symmetriske snit i terrændækket hvor det er muligt at lægge adiabatisk grænseflader, som vist på figur 2.3. Beregningen vil således alene repræsentere varmefordelingen i gulvets lodrette snit, mens afkølingen i væskens strømningsretning ikke medtages i beregningerne. I stedet benyttes der en middeltemperatur for den strømmende væske. Beregning af middeltemperaturen af den strømmende væske baseres på det samlede varmetab gennem terrændækket.

De randbetingelser der benyttes i modellen er valgt som følger:

Der udveksles varme til rummet langs dets øvre overflade ved konvektion, samt ved langbølget (varmestråling) og kortbølget (solindstråling) strålingsudveksling med omgivelserne. Langs de indbyggede væskerekredse tilføres varme ved konvektion. Endelig påvirkes terrændækkets temperaturforhold af varmetabet mod jord der er indført ved at den nederste overflade påtrykkes en fast jordtemperatur med en fast overgangsisolans. Langs modellens øvrige overflader benyttes adiabatisk randbetingelser.

Som input og output i modellen af terrændækket, skal det være muligt at bestemme de væsentligste temperaturer og varmestrømme. Her tænkes især på gulvets overfladetemperatur, varmestrøm mellem de indstøbte væskerekredse og terrændæk, samt varmestrømme mod rum og jord.

Med udgangspunkt i finite element beregningerne er det muligt at opbygge en simplificeret RC model af terrændækket, som medtager de væsentligste dynamiske egenskaber i konstruktionen. Denne konvertering beskrives nedenfor i afsnit 2.3.5.

2.3.2 Finite element model (Femlab)

Der er opbygget en finite element model af terrændækket i simuleringsprogrammet Femlab. Modellen er opbygget i overensstemmelse med figur 2.3 på side 14.

For at holde modelleringen så simpel som muligt, antages det, at overgangsisolansen mellem rørvæg og væske i gulvvarmeslangen er konstant, og ikke afhængig af det flow der er i slangen. Isolansen vælges til en realistisk størrelse. Det skal dog nævnes, at den faktiske værdi af modstanden ikke har stor betydning for de beregnede temperaturer, da isolansen er lille i forhold til de øvrige isolanser i modellen.

I denne sammenhæng foretages der ikke yderligere beskrivelse af beregningsgangen i, og teorien bag finite element metoden.

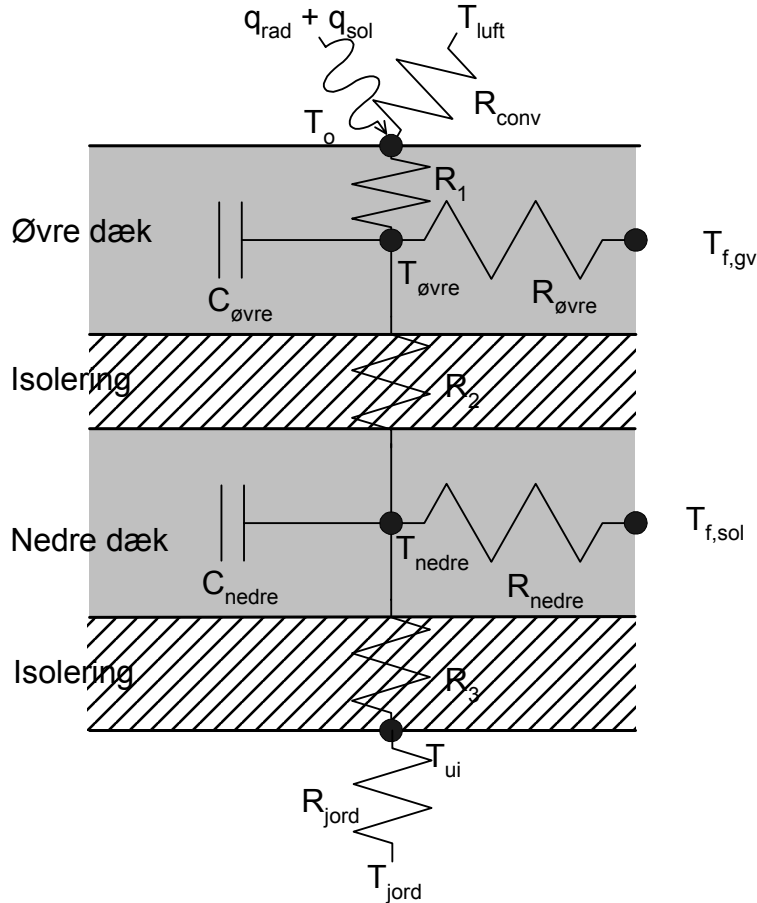
2.3.3 RC-model (Simulink)

Der er endvidere opbygget en RC-model af gulvmodulet. Denne model skal i hovedtræk have de samme dynamiske og statiske egenskaber for varmekapaciteter, varmeovergangskoefficienter, varmestrømme og temperaturforhold i finite element modellen. RC-modellen er opbygget efter den fremgangsmåde der beskrives her. RC-modellen opbygges i Simulink.

En RC-model består af et antal knudepunkter hvor temperaturen beregnes. Til hvert (internt) knudepunkt er der tilknyttet en varmekapacitet (C), og mellem knudepunkterne er der en isolans der beskriver varmestrømmen mellem to knuder. Knudepunkter der er placeret på en overflade har ikke tilknyttet nogen varmekapacitet. Det har vist sig (se fx

[Noyé]), at det generelt er tilstrækkeligt kun at benytte et lille antal knudepunkter for at få en tilstrækkelig nøjagtighed i beregningerne.

Der opbygges nu en RC-model af terrændækket, som vist på nedenstående figur. Der benyttes totalt seks knudepunkter til modellen.



Figur 2.4 Opbygning af ækvivalent RC-model

I de to centrale knudepunkter i modellen, som repræsenterer hhv. øvre og nedre dæk i gulvet, er der tilknyttet en varmekapacitet. Knudepunkterne er forbundet til hinanden via en varmemodstand, der giver en varmetransport mellem de enkelte knudepunkter.

Opstilles der ligninger til bestemmelse af forholdene i gulvet fås følgende for gulvoverflade, T_o , de to dæk, $T_{øvre}$ og T_{nedre} , samt for temperaturen lige under nederste isoleringslag, T_{ui} :

$$0 = \frac{1}{R_{conv}} \cdot (T_{luft} - T_o) + \frac{1}{R_1} \cdot (T_{øvre} - T_o) + q_{rad} + q_{sol} \quad (2.23)$$

$$C_{øvre} \frac{dT_{øvre}}{dt} = \frac{1}{R_1} \cdot (T_o - T_{øvre}) + \frac{1}{R_2} \cdot (T_{nedre} - T_{øvre}) + \frac{1}{R_{øvre}} \cdot (T_{f,gv} - T_{øvre}) \quad (2.24)$$

$$C_{nedre} \frac{dT_{nedre}}{dt} = \frac{1}{R_3} \cdot (T_{ui} - T_{nedre}) + \frac{1}{R_2} \cdot (T_{\text{ovre}} - T_{nedre}) + \frac{1}{R_{nedre}} \cdot (T_{f,sol} - T_{nedre}) \quad (2.25)$$

$$0 = \frac{1}{R_{jord}} \cdot (T_{jord} - T_{ui}) + \frac{1}{R_3} \cdot (T_{nedre} - T_{jord}) \quad (2.26)$$

Navngivningen af de indgående størrelser henviser til figur 2.4. De indgående parametre for varmekapacitet, C_x , og varmemodstande, R_x , (hvor index-x angiver at der er tale om hhv. øvre og nedre knudepunkt) findes ud fra beskrivelsen i afsnit 2.3.5.

2.3.4 Bestemmelse af væsketemperatur

Temperaturen for væsken i de to dæk, $T_{f,gv}$ og $T_{f,sol}$ findes som middeltemperaturen af væsken i slangen. Idet væskens middeltemperatur anvendes som randbetingelse langs rørvæggene i modellen, vil de udregnede temperaturer i resten af udsnittet ligeledes svare til middeltemperaturer i terrændækket. Ud fra indløbstemperaturerne og volumenstrømmen af væsken i terrændækket, er det muligt at beregne afkølingen af væsken i terrændækskonstruktionen. (Her angivet for begge væskekrede):

$$\rho_f c_{p,f} V \cdot \frac{dT_f}{dt} = \dot{m} c_{p,f} \cdot (T_{f,ind} - T_{f,ud}) - \frac{1}{R_{dæk/overflade}} \cdot (T_{f,middel} - T_{dæk/overflade}) \quad (2.27)$$

Middeltemperaturen findes ud fra den geometriske middeltemperatur af indløb og udløb fra kredsen.

$$T_{f,middel} = \frac{T_{f,ind} + T_{f,ud}}{2} \quad (2.28)$$

I ligning (2.27) og (2.28) er:

ρ_f	Densitet af væske	[kg/m ³]
V	Volumen af væske i kreds	[m ³]
$c_{p,f}$	Specifik varmekapacitet af væske	[J/kg K]
$R_{dæk/overflade}$	Varmemodstand mellem væske og dæk/overflade	[m ² K/W]
\dot{m}	Masseflow i kreds	[kg/s]
$T_{f,t,middel}$	Middeltemperatur af væske i terrændæk	[K]
$T_{dæk/overflade}$	Middeltemperatur af lag/overflade	[K]
$T_{f,ind}$	Væsketemperatur ind i terrændæk	[K]
$T_{f,ud}$	Væsketemperatur ud af terrændæk	[K]

Når der ikke er flow i væskekredsen benyttes den beregnede temperatur fra ligning (2.27) som middeltemperatur i gulvet, ud fra samme princip som beskrevet for solfangeren i afsnit 2.1.1.

Det skal bemærkes størrelserne $R_{\text{dæk/overflade}}$ og $T_{\text{dæk/overflade}}$ gælder, at størrelserne har forskellig betydninger i hhv. finite element model og i RC-model. I finite element modellen er der tale om overgangsisolans mellem væske og indvendig overflade af slange, samt overfladetemperaturen, mens det i RC-modellen er varmemodstanden mellem væske og dækket, samt temperaturen af dækket.

2.3.5 Konvertering fra finite element model til RC model

En indførelse af en simpel RC model forudsætter, at der kan bestemmes realistiske koefficienter/parametre i modellen. Størrelserne bestemmes ud fra detaljerede finite element beregninger, og konverteres herefter til den enklere RC-model, der benyttes i Simulink.

Fremgangsmåden er den, at der i den øvre og nedre gulvvarmekreds i Femlabmodellen påtrykkes væsketemperaturer, som antages at kunne forekomme under realistiske betingelser. I løbet af beregningerne gemmes data for temperaturer og varmestrømme i modellen, som herefter omregnes til en række parametre for varmemodstand og varmekapacitet, som indbygges i RC-modellen.

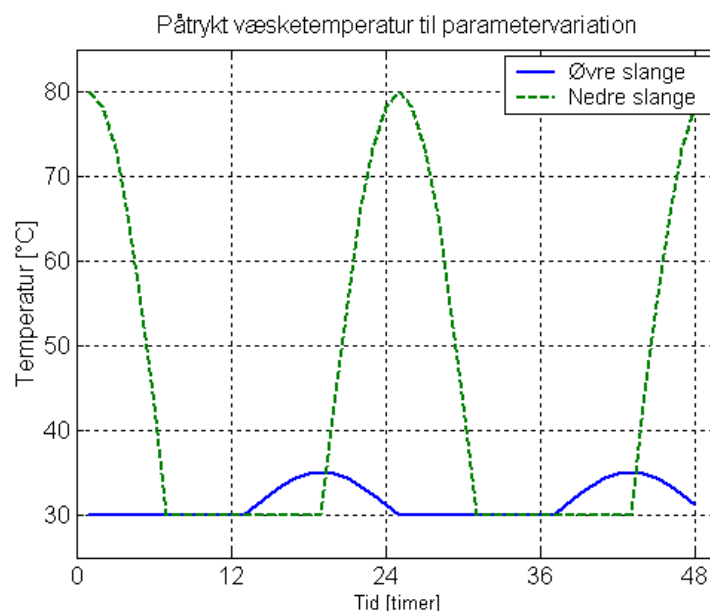
Der påtrykkes på øvre slange følgende væsketemperatur:

$$T_{\text{øvre}} = \max \left\{ 303 + 5 \cdot \sin \left(\frac{2\pi(t - 12 \cdot 3600)}{24 \cdot 3600} \right); 303 \right\} \text{ [K]} \quad (2.29)$$

På den nedre slange påtrykkes følgende væsketemperatur

$$T_{\text{nedre}} = \max \left\{ 303 + 50 \cdot \sin \left(\frac{2\pi t}{24 \cdot 3600} + \frac{\pi}{2} \right); 303 \right\} \text{ [K]} \quad (2.30)$$

På en figur ser det således ud over en periode på 48 timer.



Figur 2.5 Påtrykte temperaturprofiler i Femlabmodel

På baggrund af de udførte parametervariationer kan der beregnes værdier for varmekapacitet og varmeoverføringskoefficienter baseret på de ligninger der angives nedenfor.

Der skal findes parametre for overgangsisolanserne/varmeoverføringskoefficienterne mellem rør og beton/lager, mellem gulvvarmelag og lager, mellem beton og rum, samt mellem lager og jord. Derudover skal varmekapaciteten for lageret og gulvvarmelaget findes.

Størrelsen af de ønskede varmeoverføringskoefficienter findes ud fra følgende ligning:

$$q = h \cdot \Delta T \quad (2.31)$$

Her er:

q	Varmestrøm	[W/m ²]
h	Varmeoverføringskoefficient	[W/m ² K]
ΔT	Temperaturforskel	[K]

Denne ligning er generelt brugbar til bestemmelse af de fire ønskede varmeoverføringskoefficienter der indgår i RC-modellen. Her findes varmeoverføringskoefficienten altså på baggrund af en temperaturforskel, samt varmemstrømmen mellem de to temperaturer.

Dog kan ligning (2.31) ikke umiddelbart benyttes til bestemmelse af varmeoverføringskoefficienterne i modellen. I stedet er det nødvendigt, at omskrive ligningen til en form hvor de diskretiserede data, der beregnes i finite element modellen, kan benyttes. Varmefoverføringskoefficienten findes som varmemstrømmen mellem de to relevante knudepunkter, samt temperaturdifferensen mellem dem. I ligning (2.32) er varmeoverføringskoefficienten beregnet i de n tidsskridt der udføres beregninger for. Herefter findes varmeoverføringskoefficienten som middelværdien af de n varmeoverføringskoefficienter.

$$h_i = \frac{q_i}{\Delta T_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (2.32)$$

Det har dog vist sig, at denne beregningsmetode ikke er god, hvis der er en lille temperaturforskel mellem de to knudepunkter. I stedet benyttes en anden beregningsmetode, der er vist i [Courville] hvor summen af varmemstrømmen i alle tidsskridt divideres med summen af temperaturdifferensen i alle tidsskridt. Denne metode giver en bedre (middel)værdi for varmeoverføringskoefficienten, og er angivet i ligning (2.33).

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\sum_{i=1}^n \Delta T_i} \quad (2.33)$$

For at finde varmemodstanden, R , tages den reciprokke værdi af varmeoverføringskoefficienten, som angivet:

$$R = h^{-1} \quad (2.34)$$

For at finde varmekapaciteten af de to knuder i modellen, der udgør lager og gulvvarmelaget benyttes følgende ligning:

$$C \frac{dT}{dt} = q \quad (2.35)$$

Her er:

$$\begin{array}{ll} C & \text{Varmekapacitet af knudepunkt} \quad [\text{J/kg K}] \\ \frac{dT}{dt} & \text{Temperaturændring pr. tidsenhed i knudepunkt} \quad [\text{K/s}] \end{array}$$

Igen kan ligningen ikke umiddelbart benyttes, men må omskrives ved hjælp af en diskretisering. Størrelsen af varmekapaciteten i hvert af de to knudepunkter findes som varmemestrømmen gennem grænsefladerne af det kontrolvolumen, som afgrænser lageret, divideret med ændringen af temperaturen i knudepunktet i løbet af det enkelte tidsskridt. De varmemestømme der indgår i de to knudepunkter, er varmemestrømmen til det andet knudepunkt, samt mod rum eller jord, samt varmemestrømmen fra slangen i væsken, ganget med tidsskridtets længde. Se eventuelt figur 2.4 i afsnit 2.3.3 på side 15.

Tilsvarende til ligning (2.32) beregnes der n værdier af varmekapaciteten, hvorefter midelværdien beregnes.

$$C_i = \frac{\sum_{bnd} q^{(i)}}{T^{(i+1)} - T^{(i)}} \cdot \Delta t, \quad C = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} C_i \quad (2.36)$$

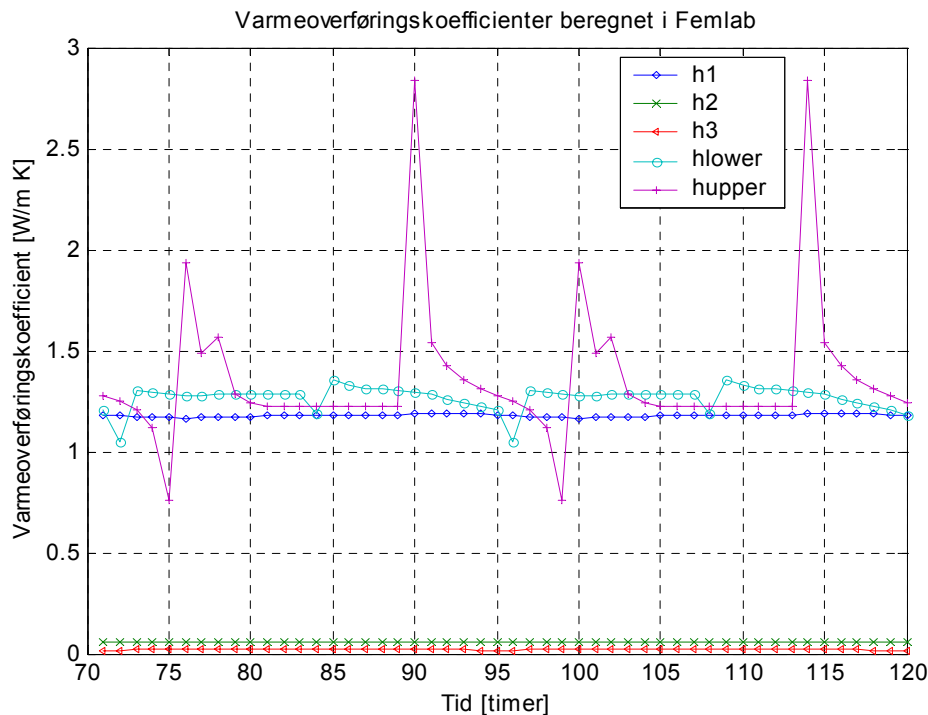
Her betyder index ”bnd” på summationstegnet, at der er tale om summen af varmemestømmene regnet med fortegn til og fra knudepunktet.

Som for ligning (2.32) skal det dog bemærkes, at ligning (2.36) kan give problemer i beregningen af varmekapaciteten, idet temperaturændringen over to tidsskridt kan være numerisk set lille, hvorved varmekapaciteten der udregnes i enkelte af tidsskridtene, kan blive meget stor. Derfor benyttes igen samme fremgangsmåde, hvor den ønskede (middel)værdi beregnes som summen af varmemestømmene i alle tidsskridt divideret med summen af temperaturdifferensen i alle tidsskridt, ganget med tidsskridtets længde.,

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \sum_{bnd} q^{(i)} \right\}}{\sum_{i=1}^{n-1} T^{(i+1)} - T^{(i)}} \cdot \Delta t \quad (2.37)$$

Nedenfor på figur 2.7 vises resultatet af en beregning af varmekapaciteten i hvert tidsskridt, beregnet med ligning (2.36).

Beregnes varmeoverføringskoefficienterne på baggrund af en beregning i Femlab, med de i figur 2.5 viste væsketemperaturer, beregnes følgende varmeoverføringskoefficienter på baggrund af ligning (2.32). Figuren viser den beregnede varmeoverføringskoefficient som funktion af tiden i timer efter endt indsvingning. I praksis er det de sidste to døgn af en beregning på én uge med de angivne væsketemperaturer, der er benyttet til beregningerne, som vises på figuren.

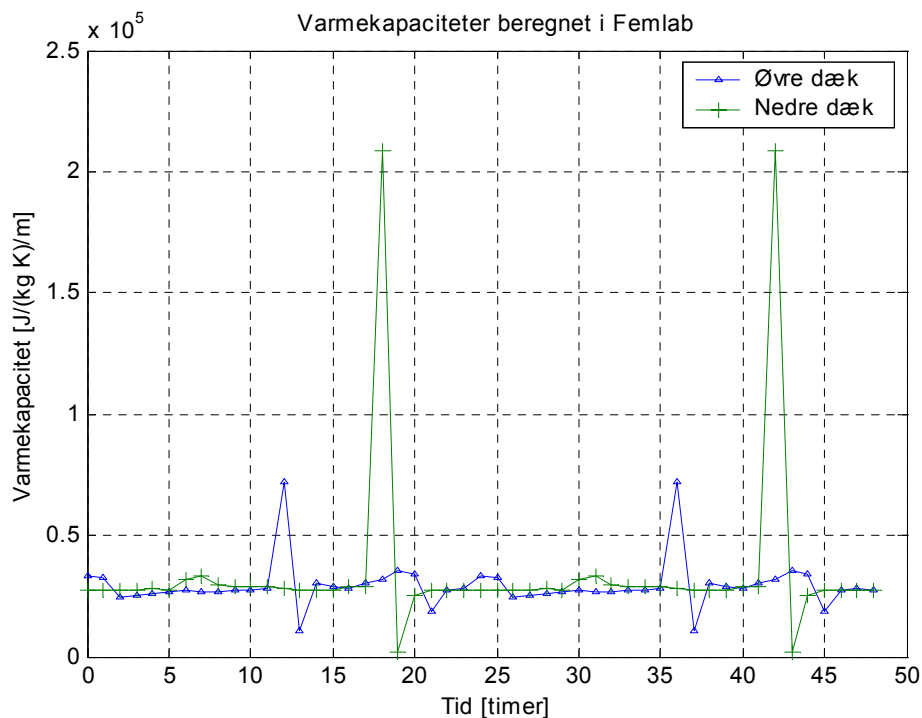


Figur 2.6 Varmeoverføringskoefficienter beregnet i Femlab

Som det ses, er størrelserne af varmekoefficienterne h_1 , h_2 og h_3 stort set konstante, mens $h_{\text{øvre}}$ og h_{nedre} er mere svingende. Størrelserne svarer til dem der er defineret i ligning (2.23) til (2.26) og på figur 2.4. På grund af udsvingene i størrelsen af h_{nedre} og $h_{\text{øvre}}$ er valget af beregningsmetoden af middelværdien af varmeoverføringskoefficienterne kritisk, og en fremgangsmåde som beskrevet i ligning (2.32) er ikke god her. I stedet kan fremgangsmåden i ligning (2.33) med fordel benyttes.

Bemærk enheden for varmeoverføringskoefficienten, der her er angivet i sammenhæng med det udsnit der benyttes i Femlabmodellen, hvorved enheden bliver W/m K og ikke $\text{W/m}^2 \text{K}$.

Kigges der på varmekapaciteten i de to knudepunkter, der repræsenterer de to dæk i konstruktionen, fås følgende figur, der igen viser de sidste to døgn af en beregning på én uge.



Figur 2.7 Varmekapaciteter i de to knudepunkter beregnet i Femlab

Igen kan der knyttes de samme kommentarer til figur 2.7 som til figur 2.6, idet det dog her er endnu tydeligere, at en middelværdi baseret på de enkelte beregningspunkter ikke vil give en sand værdi, idet de ekstreme værdier får for stor indflydelse på den beregnede middelværdi.

Samlet kan det derfor siges, at beregningen af varmeoverføringskoefficienter og varmekapaciteter foretages ved hjælp af hhv. ligning (2.33) og ligning (2.37).

I afsnit 2.3.7 på side 25, vises resultaterne af de parametervariationer der foretages til bestemmelse af de indgående parametre.

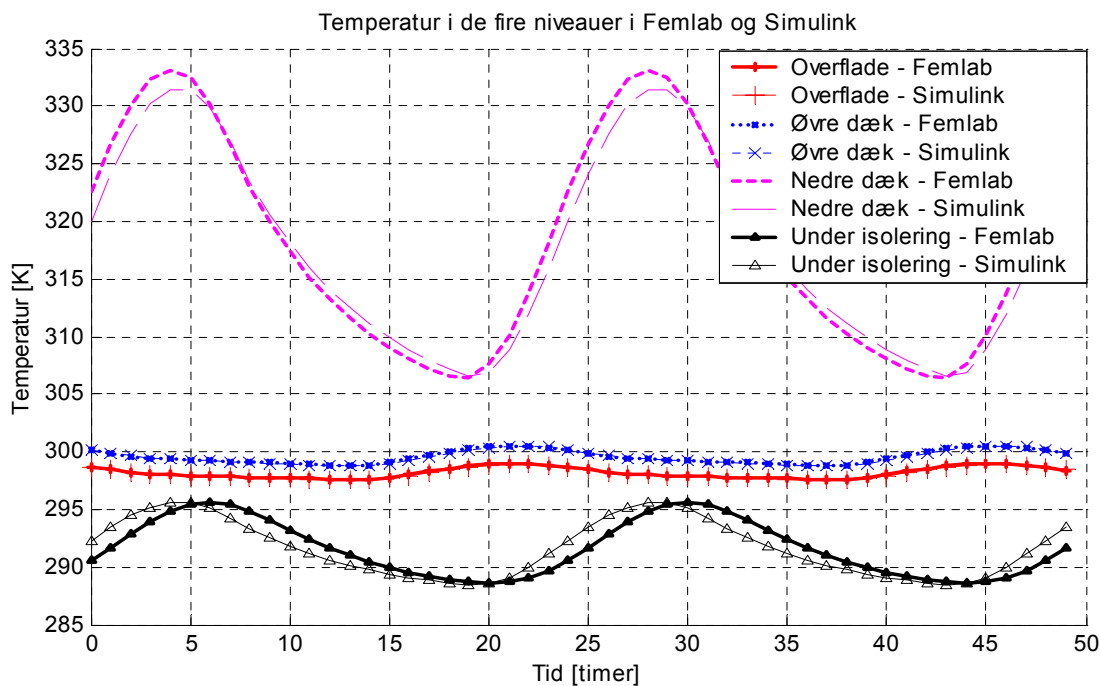
2.3.6 Sammenligning af beregningsresultater

Der foretages herefter beregninger, for at eftervise, at den tilpassede RC-model giver resultater, der er i overensstemmelse med den langt mere detaljerede finite element beregning.

De beregnede middelværdier anvendes i den opbyggede Simulinkmodel, hvor der påtrykkes de samme betingelser for væsketemperatur, samt rum- og jordtemperatur.

2.3.6.1 Dynamisk sammenligning

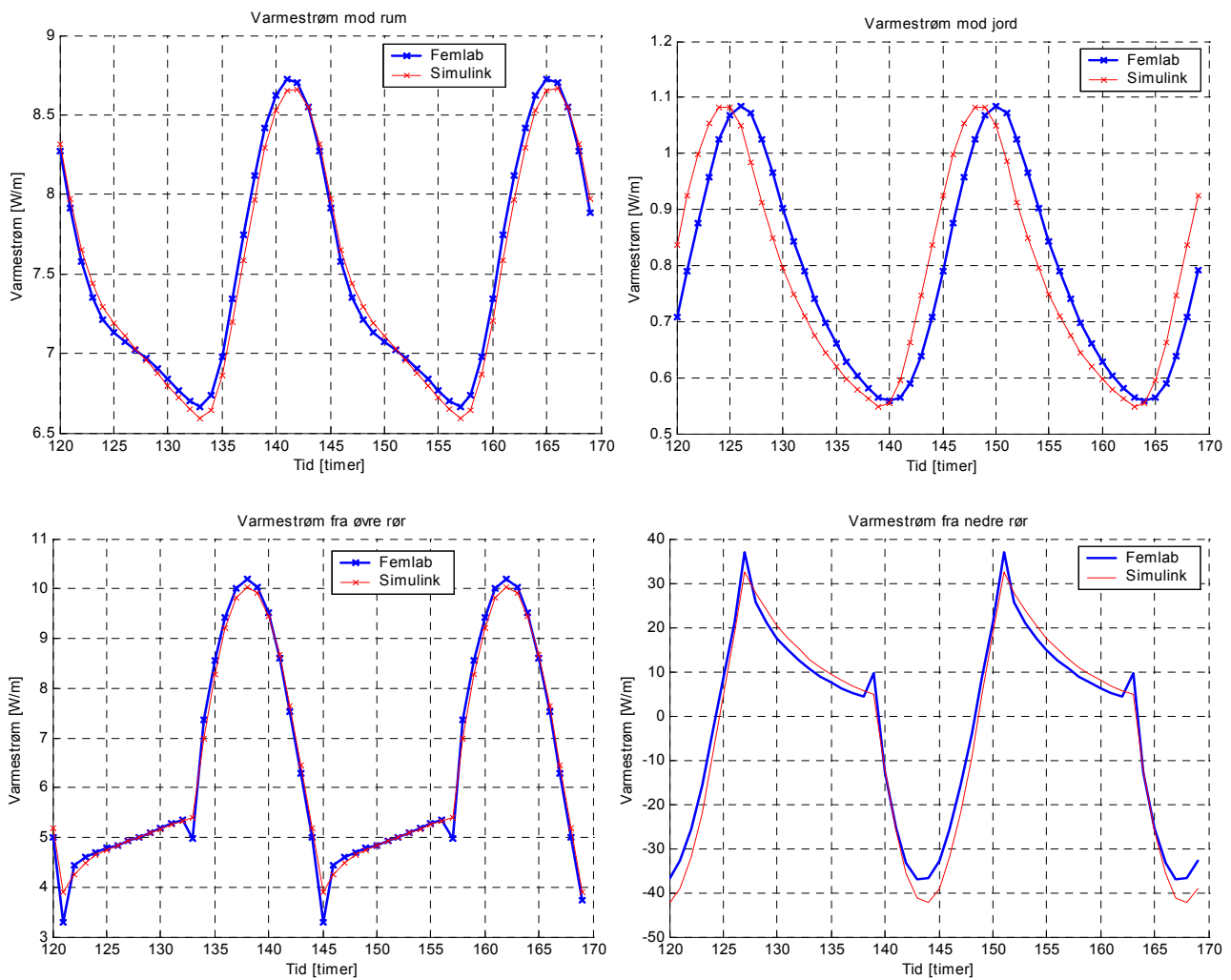
Sammenlignes de beregnede temperaturforløb i Simulink og Femlab, kan det undersøges hvorvidt den simplificerede Simulinkmodel udviser de samme egenskaber, som der er fundet i Femlab. Det giver anledning til følgende figur for temperaturerne i de fire knudepunkter: Overflade mod rum, i det øvre dæk, i det nedre dæk samt umiddelbart under isoleringen.



Figur 2.8 Temperaturforløb i Femlab og Simulink i de fire knudepunkter

Som det ses, er der god overensstemmelse mellem de metoders beregningsresultater. Især er der god overensstemmelse mellem temperaturen på gulvoverfladen og i det øvre dæk, både hvad fase og værdi angår. For de to øvrige knudepunkter er der knap så god overensstemmelse, idet der er en mindre faseforskydning i forløbene, hvorimod værdierne er meget ens. Energimæssigt vil dette dog næppe have en større betydning idet der er tale om en faseforskydning og ikke en forskel i middelværdi.

Betragtes varmestrømmene i modellen, angives følgende figurer for de enkelte knudepunkter.



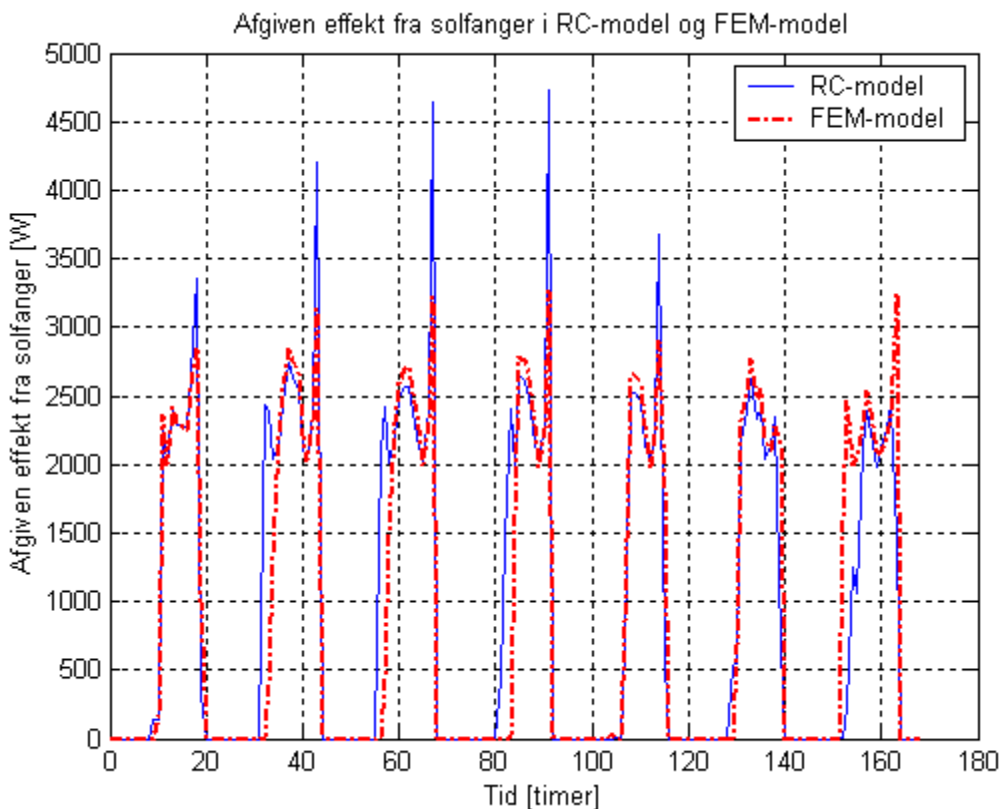
Figur 2.9 Varmestrømme beregnet i Femlab og Simulink i de fire knudepunkter

Som det ses af de fire underfigurer i figur 2.9 er der god overensstemmelse mellem de to modeller, og alle de vigtigste dynamiske egenskaber, med få undtagelser, kan genfindes i både Femlab og Simulink.

2.3.6.2 Energimæssig sammenligning

Sammenligningen foretages ved, at der opbygges en model af gulvet og solfanger. Det antages, at al varme fra solfangeren sendes i lageret. Beregningerne udføres for både RC-model og finite element modellen, og resultaterne sammenlignes. På grund af den lange beregningstid laves der kun beregninger for én uge på en model hvor kun gulv, solfanger og styring er tilsluttet. For at simulere dynamik påtrykkes der en rumtemperatur til oversiden af gulvet, der sikrer, at gulvvarmeanlægget er tændt om natten, og slukket om dagen.

På figur 2.10 sammenlignes den afgivne effekt i solfangeren, som er lig med den optagne i lageret, for de to beregningsmetoder, over en periode på en uge.



Figur 2.10 Afgiven effekt fra solfanger til lager

Som det ses, er der generelt stor lighed i den afgivne effekt i de to beregninger. Beregnes den samlede afsatte energimængde til gulvet i den viste periode fås, at der i finite element modellen er blevet afsat 158 kWh, mens der i RC-modellen er afsat 164 kWh, svarende til en forskel på cirka 4 % i forhold til finite element modellen.

Det antages på baggrund heraf, at den opbyggede Simulinkmodel på tilfredsstillende vis gengiver de forhold, som er i modellen, og at den derfor kan benyttes til de videre beregninger.

2.3.7 Parametre til input i RC-model

Der er efterfølgende foretaget beregninger, for at finde parametre for de isolanser og varmekapaciteter, der skal benyttes i Simulink, for at få den til at ækvivalere de tilsvarende beregninger foretaget i Femlab.

I tabel 2.1 er angivet parametre, der er fundet ved beregninger i Femlab. I venstre kolonne er listet de parametervariationer, der er gennemregnet. Der benyttes en kode til beskrivelsen af hver beregning. Første tal angiver tykkelsen af det øvre dæk (gulvvarmedækket), næste tal angiver tykkelsen af isolering mellem de to dæk, dernæst tykkelsen af nedre dæk (varmelagringsdækket). Fjerde tal er tykkelsen af det nedre isoleringslag. Det sidste tal angiver rørafstanden, om dernæst angives, om der benyttes beton eller sand som nedre dæk. Alle tykkelser er her angivet i cm.

Hver af de syv opbyggede gulvmodeller har fået tildelt et ”typenavn”, ved et bogstav fra a til g, som er en kode der benyttes i resultatafsnittet.

De syv parametre der er beregnet henviser til figur 2.4 side 16, hvor deres placering er gengivet.

Tabel 2.1 Parametre ved forskellige konfigurationer. Resultater angivet med mange decimaler, af hensyn til brug i programmet. Isolanser og varmekapaciteter henviser til figur 2.4 side 16

Type	Type-navn	R_1 [m ² K/W]	R_2 [m ² K/W]	R_3 [m ² K/W]	R_{nedre} [m ² K/W]	$R_{øvre}$ [m ² K/W]	$C_{øvre}$ [J/m K]	C_{nedre} [J/m K]
10-10-10-20-30-beton	a	0,024655	2,537556	4,896041	0,109979	0,116514	198806,7	194846,7
10-10-10-20-50-beton	b	0,02496	2,532097	4,901077	0,220455	0,231499	319233,3	320720
10-5-10-25-30-beton	c	0,02571	1,299489	6,122199	0,108704	0,116859	190153,3	196973,3
10-25-10-5-30-beton	d	0,023833	6,196811	1,206952	0,111974	0,116108	193153,3	187173,3
10-25-30-5-30-sand	e	0,02378	6,241678	1,414827	0,233017	0,115964	188126,7	389160
10-25-30-5-30-beton	f	0,023853	6,272476	1,26925	0,111815	0,115973	189620	559573,3
10-10-30-20-30-beton	g	0,024641	2,606474	4,927403	0,11236	0,115982	187386,7	554893,3

Som udgangspunkt kan det ses, at isolansen mellem den øvre slange og dækket ($R_{øvre}$) er stort set konstant for alle simuleringer, bortset fra type b hvor der er en større slangeafstand. For det nedre dæk kan det ses, at der er forskel på isolansen om der benyttes beton eller sand. Størst isolans fås for sandlageret, hvilket er meget naturligt, idet sand har en dårligere varmeledningsevne (støre isolans) end beton.

Det skal noteres, at hvis isolanserne R_1 , R_2 og R_3 summeres, og denne størrelse sammenlignes med en beregning af den endimensionale isolans af konstruktionen, fås resultater der stemmer overens med en afvigelse på omkring 2 %.

Typen "a" er grundsimuleringen, som der tages udgangspunkt i. Her er der øverst et betondæk på 100 mm som benyttes til gulvvarmeslangerne, herefter er der 100 mm isolering, yderligere 100 mm betondæk, og nederst 200 mm isolering. Afstanden mellem slangerne i gulvvarmekreds og varmelagringskreds er på 300 mm.

I de øvrige typer varieres der på enten tykkelsen af lageret, materialet i lageret (beton eller sand), fordelingen af de 300 mm isolering og afstanden mellem slangerne.

2.4 Fundament

Samlingen mellem væg og gulv giver anledning til et linietaf tab som skal bestemmes, for at de faktiske forhold der findes i gulvet, kan modelleres.

2.4.1 Beregning af liniekuldebro

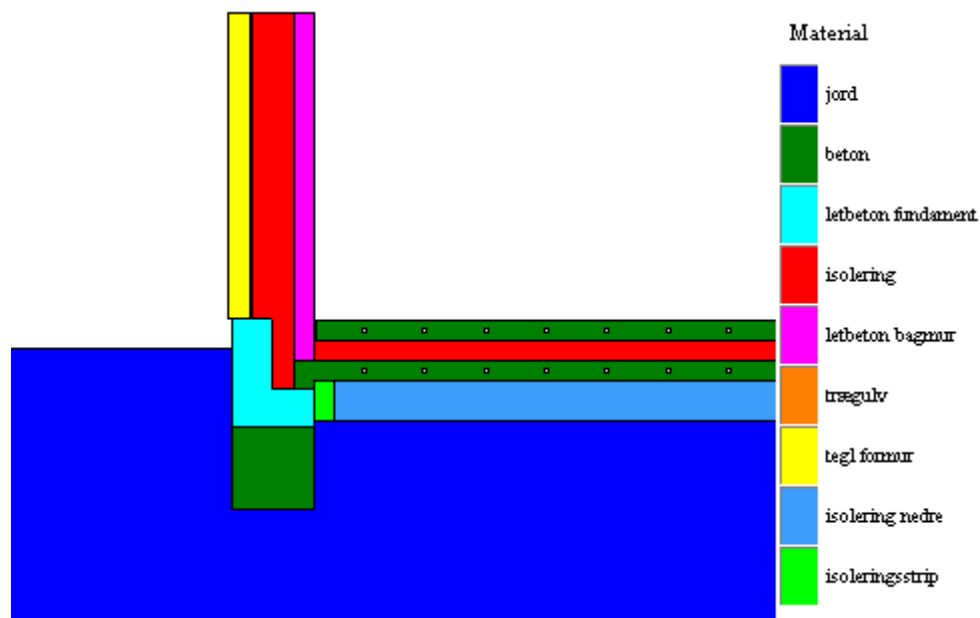
I [DS418, tillæg 4] findes der en fremgangsmåde til bestemmelse af linietaf tab for ydervægsgfundamenter ved terrændæk. Kort beskrevet er fremgangsmåden følgende:

- Der opbygges en model af fundament, væg og terrændæk. Der skal medtages 4 m terrændæk og 1,5 m ydervæg. Derudover skal der være et jordvolumen på 20 m gange 20 m.
- Den samlede todimensionale varmestrøm gennem væg og terrændæk (inklusive fundament) beregnes.

- De endimensionale bidrag gennem væg og terrændæk findes og trækkes fra den samlede todimensionale varmestrøm
- Differensen divideres med den gennemsnitlige temperaturdifferens mellem inde- og udetemperatur i beregningsperioden.

Denne fremgangsmåde kan dog desværre ikke benyttes for en konstruktion med gulvvarme og varmelagring i det nedre dæk, hvilket dels skyldes metodens opbygning, idet opvarmningen af rummet jo foretages af gulvvarmeslanger der er placeret nede i terrændækket, hvorved det ikke giver mening, at benytte varmestrømmen ud gennem væg og terrændæk, som basis for beregning af liniekuldebroen omkring fundamentet.

I stedet benyttes der en anden fremgangsmåde til bestemmelse liniekuldebroen. I Heat2 [Heat2] opbygges der en model af et tværsnit af huset, bestående af ydervæg, fundament og terrændæk. I figur 2.11 er den opbyggede model vist, med angivelse af de indgående materialer.



Figur 2.11 Model opbygget i Heat2 til bestemmelse af liniekuldebro

I stedet beregnes liniekuldebroen for fundamentet som følger, idet samme modelopbygning som ovenfor benyttes, dog med indbyggede varmeslanger i de to dæk:

- Varmestrømmen der afgives i slangerne i hver af de to dæk findes
- Varmestrømmen op og ned findes for hvert af de to dæk
- Differensen mellem den afgivne varme fra slangerne i hvert af de to dæk og varmestrømmen hhv. op og ned i hvert af de to dæk, divideres med temperaturdifferensen mellem temperaturen i slangen i hvert af de to niveauer og udeluften

Der findes ved denne fremgangsmåde to værdier for liniekuldebroen fra fundamentet, én fra hvert af de to dæk. Tilsammen vil de to værdier udgøre størrelsen af fundamentstabt. Størrelsen kan umiddelbart indbygges i RC-modellen, som det beskrives nedenfor i afsnit 2.4.2.

2.4.2 Liniekuldebro i RC-model

For at indbygge det ekstra varmetab der opstår fra fundamentet i RC-modellen, skal der tilføjes et ekstra led på højresiden af hver af de to ligninger (2.24) og (2.25). Det ekstra led i hver af de to ligninger tilføjes som et ekstra varmetab, der er givet ved Ψ -værdien ganget med temperaturdifferensen mellem temperaturen i hvert af de to dæk og ude-temperaturen, som vist i ligning (2.38)

$$P_{hus} \cdot \Psi \cdot (T_{dæk} - T_{ude}) \quad (2.38)$$

Bemærk, at betontemperaturen benyttes i stedet for væsketemperaturen (eller rumtemperaturen) til bestemmelsen af varmetabet. Den fejl der herved begås, er minimal, idet temperaturforskellen mellem dæk og væske normalt er lille. Som den sidste størrelse der indgår i ligning (2.38) er omkredsen af huset, P_{hus} .

Det samlede ligningssystem for de fire knuder i gulvet kan dermed opskrives som nedenfor

$$0 = \frac{1}{R_{conv}} \cdot (T_{luft} - T_o) + \frac{1}{R_1} \cdot (T_{øvre} - T_o) + q_{rad} + q_{sol} \quad (2.39)$$

$$C_{øvre} \frac{dT_{øvre}}{dt} = \frac{1}{R_1} \cdot (T_o - T_{øvre}) + \frac{1}{R_2} \cdot (T_{nedre} - T_{øvre}) + \frac{1}{R_{øvre}} \cdot (T_{f,gv} - T_{øvre}) + P_{hus} \cdot \Psi_{øvre} \cdot (T_{øvre} - T_{ude}) \quad (2.40)$$

$$C_{nedre} \frac{dT_{nedre}}{dt} = \frac{1}{R_3} \cdot (T_{ui} - T_{nedre}) + \frac{1}{R_2} \cdot (T_{øvre} - T_{nedre}) + \frac{1}{R_{nedre}} \cdot (T_{f,sol} - T_{nedre}) + P_{hus} \cdot \Psi_{nedre} \cdot (T_{nedre} - T_{ude}) \quad (2.41)$$

$$0 = \frac{1}{R_{jord}} \cdot (T_{jord} - T_{ui}) + \frac{1}{R_3} \cdot (T_{nedre} - T_{jord}) \quad (2.42)$$

Det er dette ligningssystem for gulvet der benyttes, i de beregninger der foretages.

2.4.3 Værdier af liniekuldebroen

Ved beregninger efter fremgangsmåden i afsnit 2.4.1 findes Ψ -værdien for hvert af de to dæk til (her angivet uden mellemresultater).

$$\Psi_{øvre} = 0,08 \text{ W / mK}$$

$$\Psi_{nedre} = 0,09 \text{ W / mK}$$

I beregningerne sættes værdien af Ψ -værdien for det nedre dæk til 0 W/m K hvis der ikke sendes varme fra solfangeren ned i lageret.

I [Rose2] angives endvidere, at liniekuldebroens størrelse ikke er påvirket af om der er gulfvarme, blot giver det et større varmetab ud gennem fundamentet fordi der er en

større temperaturforskel idet betondækkets temperatur, og ikke lufttemperaturen skal benyttes i beregningerne.

Værdien af liniekuldebroen holdes konstant for alle beregninger på trods af forskellige gulvudformninger. Det skyldes dels at værdien ikke er påvirket af, om der er gulvvarme, og dels at det vurderes, at størrelsen kun vil ændres i ringe omfang.

2.4.4 Varmetab mod jord

Der skal knyttes en yderligere kommentar til beregningen af varmetabet mod jord, der angår temperaturen af jorden umiddelbart under terrændækket. Denne temperatur kan forventes at stige i løbet af en årrække, idet det nederste beton- eller sanddæk i konstruktionen tilføres varme fra solfangeren. Dermed skal der muligvis benyttes nye randbetingelser for jorden under modellen, i stedet for 10 °C og en jordisolans på 1,5 m² K/W som beskrevet i Tillæg 4 til DS418.

Ved de udførte beregninger i Heat2, viser det sig dog at temperaturen, selv med den ekstra varme der tilføres terrændækket, ikke stiger til over 10 °C efter beregningerne er stabiliseret. Dermed kan de benyttede randbetingelser for forholdene under terrændækket benyttes.

2.5 Styling

Styringen af de enkelte væskekredse beskrives i dette afsnit.

2.5.1 Gulvvarmekredsen

Gulvvarmekredsen, den øvre væskekreds i terrændækket, benyttes udelukkende som en almindelig gulvvarmekreds til opvarmning af rummet. Gulvvarmekredsen styres som en on/off kreds, hvor der tændes for flowet når temperaturen er under en fastsat setpunkttemperatur i rumluften, og der slukkes, når temperaturen tilsvarende er over setpunkttemperaturen. Denne styling ændres ikke i beregningerne.

2.5.2 Solfangerkredsen

Den varme væske fra solfangeranlægget kan kobles til soltanken og til væskekredsen i terrændækket. Det er formålet med styringen, at få så stort et udbytte af solfangeren som muligt.

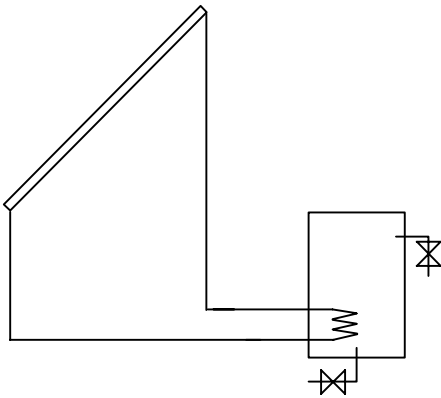
Grundlæggende er der to muligheder for den fysiske sammenkobling mellem solfangeren og soltank/terrændæk – serie eller parallel. Valget af styling og parametre i styringen undersøges herefter i de opbyggede modeller.

Som start- og stopkriterier for flowet i solfangerkredsen benyttes de i afsnit 2.1.2 angivne. Det vil sige, at der tændes for flowet når der er en temperaturforskel mellem ind- og udløb på solfangeren på over 6 K, og der slukkes igen når temperaturforskellen kommer under 1 K. Yderligere er det et krav, at der skal være en bestrålingsstyrke på overfladen af solfangeren på mindst 50 W/m². Dette krav benyttes i alle tilfælde.

Herefter beskrives hvorledes den tilgængelige varme fra solfangeren søges udnyttet i hhv. soltank og lager i gulvet.

2.5.2.1 Soltank alene

Som reference til de øvrige beregninger er der undersøgt et almindeligt solvarmeanlæg, hvor al varme fra solfangeren føres direkte i soltanken.

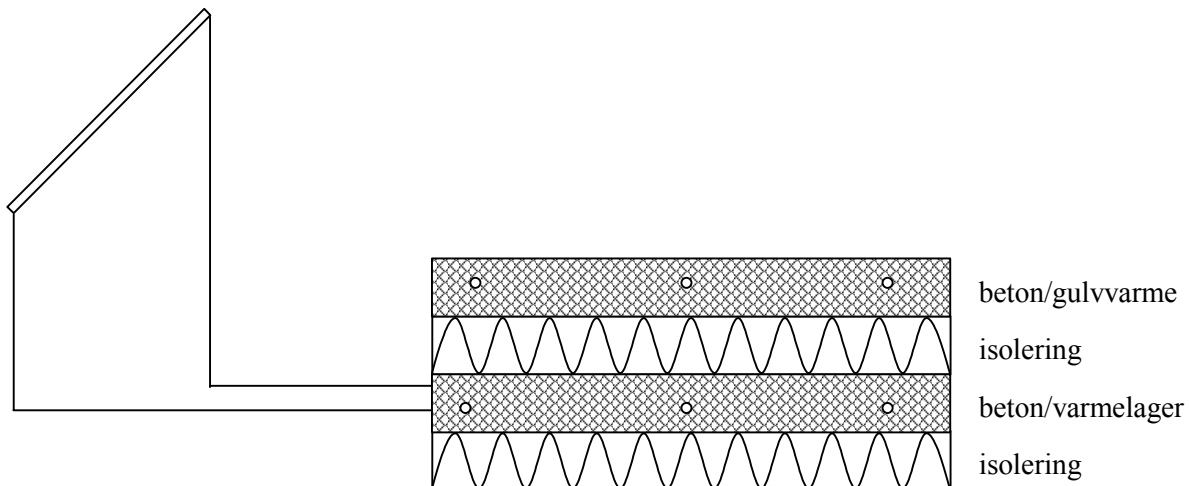


Figur 2.12 Soltank alene

Formålet med denne styring er, dels at kunne finde husets opvarmningsbehov og temperaturfordeling uden varmelagring i terrændækket, og dels at kunne undersøge om beregningsmodellen giver realistiske resultater for et konventionelt solvarmeanlæg. Som fremløb til solfangeren benyttes udløbstemperaturen fra soltanken.

2.5.2.2 Terrændæk alene

Den anden ”ekstreme” styring er at sende al varme fra solfangeren direkte i terrændækket. Her benyttes udelukkende muligheden for at sende varmen i lagerdelen af terrændækket.

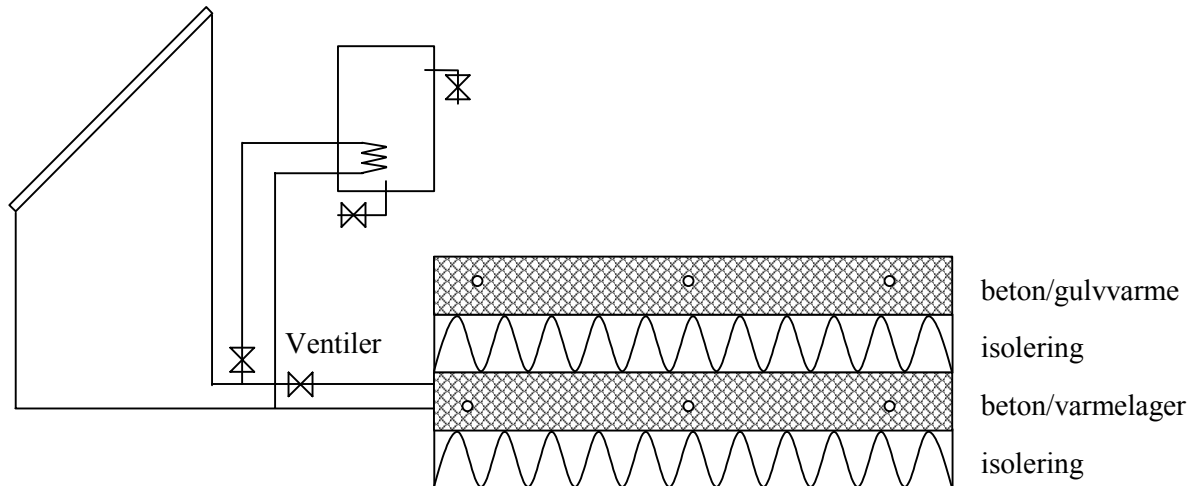


Figur 2.13 Terrændæk alene

Denne styring fungerer som ovenfor beskrevet, hvor al varme fra solfangeren gik til soltanken. Som fremløbstemperatur til solfangeren benyttes returtemperaturen fra lageret i terrændækket.

2.5.2.3 Parallelkobling

I parallelkoblingen er det muligt at fordele flowet til enten soltank, terrændæk, eller begge dele.



Figur 2.14 Parallelkobling af soltank og terrændæk

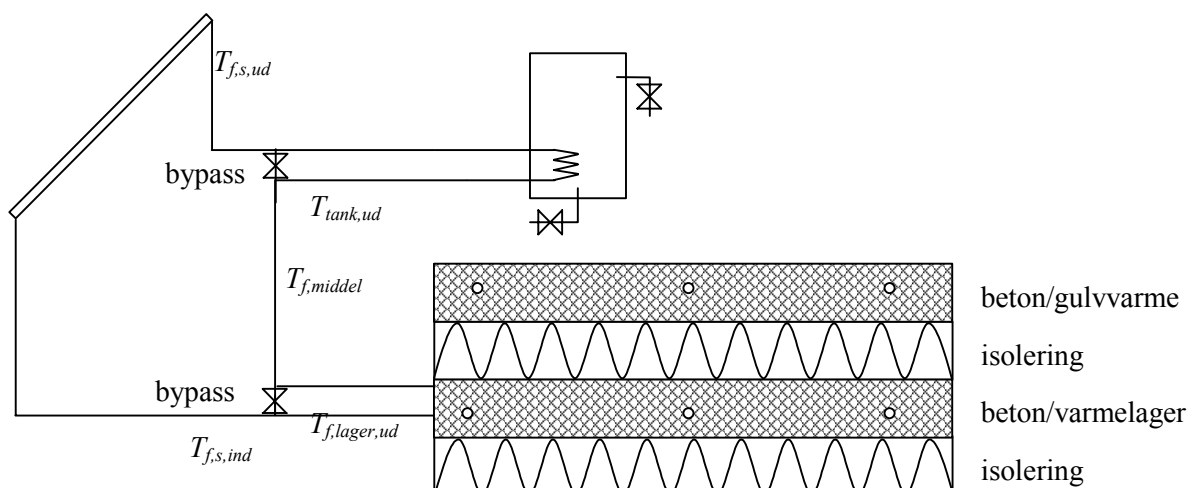
Der laves en temperaturafhængig fordeling af flowet. Det vil sige, at temperaturen i udløbet bestemmer, om flowet skal sendes i soltank eller terrændæk. Det kan så enten vælges, at når temperaturen i udløbet er lavt, skal flowet sendes til tanken og når temperaturen er høj sendes flowet til terrændækket. Det omvendte er også muligt.

Ved omslagstemperaturen er der indbygget en overgang på 5 K hvor der er flow i begge systemer, der sikrer at anlægget ikke begynder at oscillere, idet der kan være meget forskellige returtemperaturer fra soltank og terrændæk.

Returtemperaturen til solfangeren i denne styringsform er, når der er flow i kredsen en vægtning af returtemperaturerne fra soltank og terrændæk, baseret på den tildelte flowmængde. Når der ikke er flow i systemet er den returtemperatur som solfangeren "ser", givet som udløbstemperaturen fra det system, der først skal have flow.

2.5.2.4 Seriekobling med bypass

Som den sidste implementerede løsning er seriekobling med bypass.



Figur 2.15 Seriekobling med bypass af soltank og terrændæk

Seriekoblingen fungerer på den måde, at væsken fra solfangeren enten kan cirkuleres i soltanken eller i varmelageret, på den måde, at hvis soltanken kan modtage varmen, cir-

kuleres væsken igennem soltanken, og hvis lageret kan modtage varmen, cirkuleres væsken igennem lageret. Cirkulationen i de to komponenter er altså i princippet uafhængig af hinanden.

Mere detaljeret kan styringen beskrives som følger, idet det antages, at der er cirkulation i kredsen, med størrelsen \dot{m}_v , med en given fremløbstemperatur fra solfangeren kaldet $T_{f,s,ud}$.

Er $T_{f,s,ud}$ større end temperaturen i nederste del af soltanken, T_l , sættes flowet i spiralen i soltanken, \dot{m}_{tank} , lig med \dot{m}_v .

$$\dot{m}_{tank} = \begin{cases} \dot{m}_v & \text{for } T_{f,s,ud} > T_l \\ 0 & \text{for } T_{f,s,ud} \leq T_l \end{cases} \quad (2.43)$$

Efter passage af soltanken kaldes temperaturen af den cirkulerende væske for $T_{f,mellem}$. Har væsken været cirkuleret gennem soltanken er $T_{f,mellem}$ lig udløbstemperaturen fra soltanken, ellers er den $T_{f,s,ud}$.

$$T_{f,mellem} = \begin{cases} T_{f,s,ud} & \text{for } \dot{m}_{tank} = 0 \\ T_{f,tank,ud} & \text{for } \dot{m}_{tank} = \dot{m}_v \end{cases} \quad (2.44)$$

Igen sammenlignes temperaturen af væsken i kredsen, $T_{f,mellem}$, med temperaturen i lageret af gulvet, T_{nedre} . Er væsketemperaturen større end lagerets temperatur sættes cirkulationsmængden af væsken i terrændækket \dot{m}_{lager} lig med \dot{m}_v , ellers sættes den til 0.

$$\dot{m}_{lager} = \begin{cases} \dot{m}_v & \text{for } T_{f,mellem} > T_{nedre} \\ 0 & \text{for } T_{f,s,ud} \leq T_{nedre} \end{cases} \quad (2.45)$$

Returtemperaturen til solfangeren, $T_{f,s,ind}$, lig med enten $T_{f,mellem}$ eller $T_{f,lager,ud}$.

$$T_{f,s,ind} = \begin{cases} T_{f,mellem} & \text{for } \dot{m}_{lager} = 0 \\ T_{f,lager,ud} & \text{for } \dot{m}_{lager} = \dot{m}_v \end{cases} \quad (2.46)$$

Er der ikke flow i solfangerkredsen sættes den returtemperatur som solfangeren ”ser” lig med den laveste af temperaturerne i soltank eller lager.

Denne fremgangsmåde sikrer, at varmen fra solfangeren altid udnyttes maksimalt, og at det varme brugsvand prioriteres højere end varmelagring i terrændækket.

2.5.3 Eksempler på øvrige styringsmuligheder i terrændæk

Der kan dog også benyttes andre styringer end de ovenfor beskrevne for terrændækket. Soltanken inddrages hermed ikke i disse overvejelser, blot anføres det, at soltanken nemt kan medtages.

Der kan benyttes følgende styringsstrategier, enten alene eller i kombination

- Al overskydende varme fra solfangeren sendes til nedre terrændæk og hentes op i øvre dæk når der er behov for opvarmning her, fx kan nedre dæk opvarmes om dagen, og sendes op i øvre dæk om aftenen/natten. Som styringsparameter kan der

sættes, at hvis temperaturen i det nedre terrændæk er tilpas høj, til at der kan laves en aktiv varmeveksling, så den væske der cirkuleres i gulvvarmeslangerne kan opvarme rummet, kan der hentes varme op herfra til det øvre betondæk.

- Når der er overskydende varme fra solfangeren sendes det til øvre kreds hvis der er opvarmningsbehov, og nedre kreds hvis der ikke er opvarmningsbehov. Hvis der sendes varme til nedre kreds, kan det så hentes op i øvre kreds, når der er behov herfor.

2.6 Rummodel

De opbyggede modeller for gulv, solfanger og soltank/varmtvandsbeholder, kan anvendes sammen med en tidligere udviklet rummodel, der er udført i forbindelse med et eksamensprojekt [Noyé]. Rummodellen er implementeret i programmet MOWE, der er opbygget i Matlab og Simulink. Der findes i Bilag 1 en beskrivelse af programpakken bestående af Matlab og Simulink.

Modellen beskrives ikke i detaljer, men den for dette projekt væsentligste modellerings-teknik fremdrages.

Rummodellen er opbygget ud fra ønsket om at der kan foretages beregninger af et rums, eller hus', termiske og energimæssige forhold. I modellen beregnes energiforbrug, lufttemperatur i rummet samt overfladetemperaturerne på samtlige overflader i rummet. Det er herudover muligt, at beregne de termiske komfortforhold for personer, der opholder sig i rummet. Det skal understreges, at modellen kun medtager én zone, hvorved det antages, at der er samme temperaturforhold i hele huset, samt at der ikke er nogle interne flader.

Programmet er opbygget modulært, hvilket betyder, at det er muligt, at udskifte enkeltdele af rummodellen, så længe resten af modellen får de samme oplysninger (output) som de hidtil har fået. Det drejer sig her typisk om overfladetemperatur på delementet og den konvektive varmeoverførsel til rummet fra delementet.

Rummodellen er opbygget således, at der foretages beregninger af den konvektive varmeoverførsel mellem overflader og rum, samt strålingsmæssig varmeafgivelse mellem fladerne, baseret på disses indbyrdes vinkelforhold. Ligeledes foretages der en beregning af fordeling af indfalden solstråling på rummets overflader baseret på væggenes indbyrdes arealforhold.

Til beregning af temperaturer i vægge, loft, gulv og vindue(r) benyttes der en såkaldt RC-model, hvor der kan foretages beregninger af varmetransmission (R) og varmeakkumulering (C). Modellen er meget simpelt opbygget, men den indeholder de nødvendige elementer til beregningen af varmestrømsforholdene i rummets begrænsningsflader.

I modellen benyttes der en ideel opvarmning af luften i rummet, hvilket her vil sige, at hvis der er opvarmningsbehov i rummet tilføres nøjagtig den mængde energi som er nødvendig for at bringe lufttemperaturen op på det ønskede niveau. I forbindelse med det arbejde der udføres her, er det meningen, at opvarmningen i stedet for en ideel opvarmning, udskiftes med en opvarmning i form af et gulvvarmesystem og varmelagring i terrændækket.

I dette projekt udskiftes det delement af rummodellen der udgør gulvet, som udskiftes med en model baseret på den teori der er beskrevet tidligere i rapporten, hvor opvarm-

ningssystemet er indbygget i gulvet, og der er mulighed for undersøge varmelagring i terrændækket fra en solfanger.

3 Implementering

Implementeringen af den opbyggede model foretages i Matlab, Simulink og til dels i Femlab. I dette kapitel beskrives den opbyggede model, samt de antagelser der er foretaget, for at få modellen til at give tilfredsstillende resultater.

Samlet set er der opbygget en model, der kobler solfangeren sammen med modellen for terrændækket, baseret på de ligninger, der er beskrevet i kapitel 2. Denne samlede model for solfanger og terrændæk indbygges dernæst i rummodellen i MOWE (som er beskrevet i afsnit 2.6), hvor der opbygges en realistisk styring af fremløbstemperaturen i den øvre gulvvarmeslange.

3.1 Solfanger

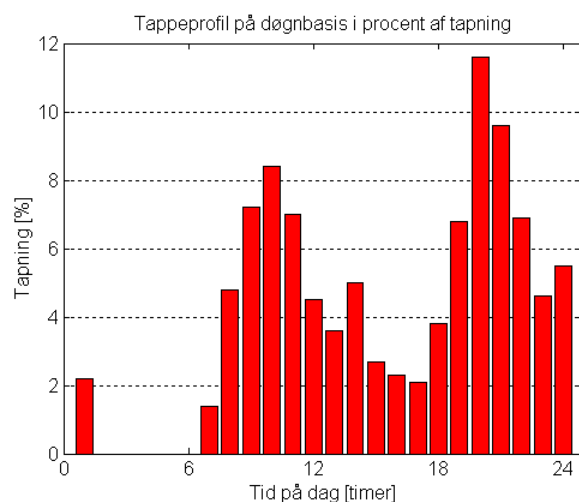
Den solfanger der benyttes i beregningerne repræsenterer en gennemsnitssolfanger på det danske marked, hvorved de fundne resultater kan anses som repræsentative for et stort spænd af standardsolfangere.

Der benyttes i beregningerne størrelser af solfangeren mellem 4 m^2 og 16 m^2 .

3.2 Soltank

Soltanken der benyttes i modellen har et volumen på $0,3 \text{ m}^3$ (300 l), og antages at have en varmekapacitet på 1300 kJ/K , med en samlet varmetabskoefficient på $2,4 \text{ W/K}$. Der antages et dagligt forbrug af varmt vand på 150 l ved 50°C , hvilket giver et samlet energiforbrug på ca. 2700 kWh på årsbasis.

Det daglige forbrugsmønster er vist på figur 3.1.



Figur 3.1 Tappeprofil – data angivet i procent af den samlede tapning

3.3 Hus

Der tages i modelleringen udgangspunkt i et hus fra Bülow og Nielsen med et areal på 129 m^2 . I [Rose] er huset behandlet i detaljer, i forbindelse med et EFP-projekt udført ved DTU.

Huset har målene $15,91 \text{ m}$ i længden, $8,11 \text{ m}$ i bredden og $2,5 \text{ m}$ i højden. Huset antages at have ca. 30 m^2 vinduer, fordelt på 15 m^2 i sydfacaden, og $7,5 \text{ m}^2$ i hhv. øst- og vestfa-

caden. I beregningerne antages det, at der udelukkende er vinduer på syd-, øst-, og vestsiden af huset.

Der benyttes i ydervæggen indefra, 100 mm porebeton, 190 mm mineraluld og 108 mm mursten. I loftet er der 300 mm mineraluld.

I gulvet benyttes der de størrelser af lager og isoleringstykkelser som er angivet i afsnit 2.3.7, og værdierne der benyttes i RC-modellen tages fra tabel 2.1, som er fundet ved beregninger i Femlab.

I det følgende listes dimensioner og materialeegenskaber for modellen af huset i nedenstående tabeller.

Tabel 3.1 Ydervæg

Opbygning	Tykkelse [m]	Varmeledningsevne [W/m K]	Densitet [kg/m ³]	Varmekapacitet [J/kg K]
Letbeton	0,100	0,20	735	1000
Isolering	0,190	0,039	30	840
Tegl	0,108	0,78	1800	900

I RC-modellen benyttes der to knuder, én midt i porebetonen, og én midt i teglmuren. Det betyder, at al varmekapacitet samles her, samt at isoleringens (lille) varmekapacitet er fordelt på de to knuder.

Tabel 3.2 Loft

Opbygning	Tykkelse [m]	Varmeledningsevne [W/m K]	Densitet [kg/m ³]	Varmekapacitet [J/kg K]
Træ	0,022	0,17	600	2500
Isolering	0,250	0,039	30	840

Det antages, at huset er et etplans hus med et ventileret lofthulrum.

Tabel 3.3 Vindue og ramme/karm

Vindueselement	U-værdi/ ψ -værdi
Lavenergi tolagsrude	1,28 W/m ² K
Ramme/karm	1,60 W/m ² K
Lineær transmissionskoefficient	0,04 W/m K

Det er valgt at benytte en rude med en U-værdi der er i den lave ende af skalaen.

Som udgangspunkt benyttes der i huset ikke et ventilationsanlæg med varmegenvinding og der antages et luftskifte på 0,5 gange i timen ved infiltration, eller udsugning. Der opbygges dog også en model med et ventilationsanlæg med varmegenvinding med en effektivitet på 0,9, stadig med et luftskifte på 0,5 gange i timen. Derudover sættes der en infiltration på 0,1 gange i timen.

De samlede arealer i modellen angives i følgende tabel

Tabel 3.4 Areal og orientering af modellens flader

Flade	Areal [m ²]	Orientering
Væg	24,8	syd
Væg	12,8	øst
Væg	12,8	vest
Væg	39,8	nord
Vindue	15,0	syd
Vindue	7,5	øst
Vindue	7,5	vest
Loft	129,0	-
Gulv	129,0	-

Der tages i modellen ikke højde for:

- liniekuldebroer bortset fra fundamentstab og psi-værdi for vinduerne
- punkttab i husets hjørner
- at der er tale om et hus med flere rum. Huset betragtes her kun som en enkel zone med samme temperatur i hele huset.

Dette er gjort, dels for at holde beregningstiden i den opbyggede model på et acceptabelt niveau, og dels af implementeringstekniske årsager, men også fordi det vurderes at de øvrige bidrag ikke har en væsentlig indflydelse på resultaterne.

3.3.1 Samlet vurdering af husets energimæssige forhold

Det netop beskrevne hus er et velisoleret hus, der lever op til de krav der stilles i det nuværende bygningsreglement [BRs98] angående opvarmningsbehov. Benyttes der endvidere en varmegenvindingsenhed vil huset kunne leve op til det kommende BR2005.

3.4 Styring

3.4.1 Solfangerkreds

Som styring benyttes de muligheder der er angivet i afsnit 2.5.2. Ligeledes benyttes der de her beskrevne start- og stopkriterier som uanset styringsform, vil igangsætte flowet i kredsen ved en temperaturforskel på 6 K mellem indløb og udløb, og slukke for flowet ved en temperaturforskel på 1 K.

3.4.2 Gulvvarmekreds

I gulvvarmekredsen benyttes der en on/off styring med en setpunktstemperatur i huset på 20 °C, og der benyttes ikke noget dødbånd i styringen. Der benyttes i alle beregninger en fremløbstemperatur på 35 °C. Der er i beregningerne tændt for anlægget hele året.

I forbindelse med gulvvarmeanlæg er der ofte et ønske fra brugeren om, at der skal være komfortvarme på gulvet i sommerperioden. Komfortvarme vil her sige, at der i (især) klinkebelagte rum holdes en overfladetemperatur på gulvet på mindst 24 °C (eller højere) om sommeren. I en EFP-rapport fra Teknologisk Institut med titlen: "Vurdering af varmekonsum i nyere huse med gulvvarme" [Radisch], er energiforbruget i huse med gulvvarme sammenlignet med huse uden. En af konklusionerne her er, at folk af komfortensyn har tændt for gulvvarmen hele året i klinkebelagte rum. Samtidig er det fundet, at der er en stor andel klinkebelagte rum i nye huse. Dette forhold giver et merforbrug på opvarmningen.

I resultatafsnittet vurderes det hvorvidt varmelagring i terrændækskonstruktionen kan minimere eller helt fjerne behovet for at benytte gulvvarmeanlægget, til at levere komfortvarme til rummet.

4 Resultater

I dette kapitel behandles de resultater der er opnået i forbindelse med projektet.

4.1 Forudsætninger

Der benyttes i beregningerne en række forudsætninger som kort ridses op her:

- Rumtemperaturen er sat til ikke at overstige 26 °C, idet det antages, at hvis temperaturen overstiger denne grænse, bliver vinduet åbnet med deraf følgende større luftskifte i rummet og lavere temperatur.
- I gulvet benyttes der en konstant samlet isoleringstykkelse af de to isoleringslag, således at summen af de to er på 300 mm
- Der kigges ikke på om der opstår kogning i soltanken
- Der benyttes samme type solfanger og soltank til alle beregninger
- Som udgangspunkt gælder analyserne for huset uden varmegenvinding. Resultaterne med varmegenvinding beskrives mere summarisk, og der gøres tydeligt opmærksom på at resultaterne gælder for huset med det lave opvarmningsbehov.

4.2 Resultatanalyse

Resultatanalysen rummer tabeller og figurer for de beregninger der er foretaget i modellen.

I afsnittene vurderes resultaterne løbende, og sammenlignes med eksisterende resultater. I afsnit 4.2.1 vurderes hele modellen endvidere også samlet.

I de følgende afsnit benyttes der gennemgående en tabel med angivelse af beregningsresultaterne. I tabellen nedenfor er vist et eksempel på tabellen

Tabel 4.1 Tabel til angivelse af beregningsresultater

Type	Q _{opv} [kWh]	Q _{sol,gulv} [kWh]	Q _{fund,ø} [kWh]	Q _{fund,n} [kWh]	Q _{jord} [kWh]	Q _{f+j} [kWh]	Q _{sol,tank} [kWh]	Q _{soltot} [kWh]	Q _{sup} [kWh]	Q _{tap} [kWh]	dæk- ning	nyttig [kWh]
a-4	9327	0	530	0	1957	2487	1725	1764	1256	2618	52%	1362

I tabellen er angivet afsat energi i gulvvarmeslangen (Q_{opv}) svarende til husets opvarmningsbehov, afsat energi i gulvet fra solfanger ($Q_{sol,gulv}$), varmetab fra det øvre dæk gennem fundamentet ($Q_{fund,ø}$), varmetab fra det nedre dæk gennem fundamentet ($Q_{fund,n}$), varmetab mod jord (Q_{jord}), samlet varmetab til fundament og mod jord (Q_{f+j}), afsat energi i soltanken ($Q_{sol,tank}$), total afsat energi i solfangeren (Q_{soltot}), tilført supplerende energi til soltanken (Q_{sup}), tappet energi fra soltanken (Q_{tap}), dækningsgraden af det varme vand og endelig den totale nyttiggjorte varme fra solfangeren i både lager og i soltank.

Dækningsbidraget til det varme brugsvand er fundet ved:

$$dækning = \frac{Q_{tap} - Q_{sup}}{Q_{tap}} \quad (4.1)$$

Den nyttiggjorte varme fra solfangeren findes som tilskuddet til det varme brugsvand, plus reduktionen i opvarmningsbehovet i huset i forhold til beregningen uden varmelagring.

$$\text{nyttiggjort} = (Q_{\text{tap}} - Q_{\text{sup}})_{\text{soltank}} + (Q_{\text{opv,uden solfanger}} - Q_{\text{opv,med solfanger}}) \quad (4.2)$$

I søjlen ”Type” er angivet hvilken af de syv gulvmodeller der er benyttet, samt hvilket solfangerareal der er brugt i beregningen. Opbygningen af de enkelte modeller er vist i tabel 2.1 Således er der i tabel 4.1 benyttet en gulvmodel af typen ”a” med et solfangerareal på 4 m², hvor al varme fra solfangeren sendes til soltanken.

4.2.1 Soltank

Indledningsvis er der foretaget en serie beregninger hvor der ikke sendes varme fra solfangeren ned i varmelageret. Herved findes referenceopvarmningsbehovet for huset, og den varme der afsættes i solfangeren med den benyttede model findes også.

4.2.1.1 Beregningsresultater

I tabel 4.2 er hovedresultaterne fra en serie beregninger af huset med de forskellige gulvtyper vist. Al varme fra solfangeren er sendt i soltanken.

Tabel 4.2 Beregningsresultater for den styring hvor al varme sendes i soltanken

Type	Q _{opv} [kWh]	Q _{sol,gulv} [kWh]	Q _{fund,ø} [kWh]	Q _{fund,n} [kWh]	Q _{jord} [kWh]	Q _{f+j} [kWh]	Q _{sol,tank} [kWh]	Q _{soltot} [kWh]	Q _{sup} [kWh]	Q _{tap} [kWh]	dæk- ning	nyttig [kWh]
a-4	9327	0	530	0	1957	2487	1725	1725	1256	2618	52%	1362
b-4	9095	0	529	0	1743	2272	1725	1725	1256	2618	52%	1362
c-4	9335	0	530	0	1951	2481	1725	1725	1256	2618	52%	1362
d-4	9295	0	530	0	1960	2489	1725	1725	1256	2618	52%	1362
e-4	9261	0	530	0	1899	2429	1725	1725	1256	2618	52%	1362
f-4	9278	0	530	0	1920	2500	1725	1725	1256	2618	52%	1362
g-4	9364	0	530	0	1893	2423	1725	1725	1256	2618	52%	1362
a-8	9327	0	530	0	1957	2487	2497	2497	923	2935	69%	2012
a-12	9327	0	530	0	1957	2487	3149	3149	787	3166	75%	2379

Som det ses, er opvarmningsbehovet for huset i de 7 tilfælde stort set identisk, med en værdi på omkring 9300 kWh. Størrelsen er i overensstemmelse med de resultater, som er fremkommet i [Rose], baseret på et stort set identisk hus¹. Hermed antages, at den samlede bygningsmodel giver troværdige beregningsresultater.

Kun type ”b” giver et lavere energiforbrug, hvilket skyldes den større rørafstand på 50 cm i modsætning til 30 cm. Det lavere energiforbrug skyldes her blot, at temperaturen i rummet i kolde perioder bliver for lav, idet der ikke kan afsættes nok varme i gulvvarmeslangen med den valgte væsketemperatur.

Varmetabet mod jord og fundament er angivet, for at det senere kan vurderes, hvor stort ekstra tab der opstår, når det nedre dæk opvarmes.

¹ I [Rose] findes opvarmningsbehovet til 14000 kWh, men med væsentlig andre værdier for intern varmebelastning og til dels solindfald. Korrigeres der for dette, bliver forskellen i opvarmningsbehov på under 1000 kWh, hvilket er tilfredsstillende, når forskellen i beregningsmodel og detaljeringsgrad medregnes.

Tilsvarende kan der opstilles data for beregningsresultaterne foretaget i modellen med varmegenvinding, hvor huset lever op til de krav, der vil blive stillet i bygningsreglementet 2005. I beregningerne skal det bemærkes, at data for soltanken er identisk med beregningerne fra huset uden varmegenvinding angivet i tabel 4.2.

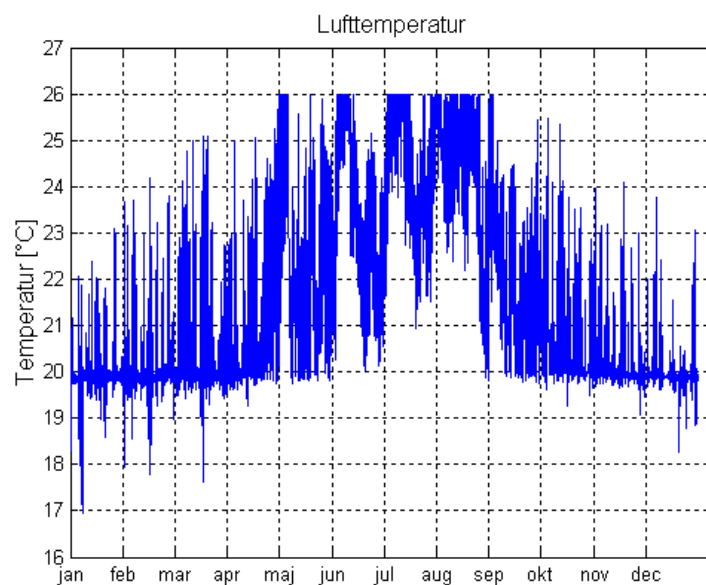
Tabel 4.3 Beregningsresultater for den styring hvor al varme sendes i soltanken, hus med varmegenvinding

Type	Qopv [kWh]	Qsol,gulv [kWh]	Qfund,ø [kWh]	Qfund,n [kWh]	Qjord [kWh]	Qf+j [kWh]	Qsol,tank [kWh]	Qsoltot [kWh]	Qsup [kWh]	Qtap [kWh]	dæk- ning	nyttig [kWh]
a-4	4998	1	507	0	1873	2380	1725	1725	1256	2618	52%	1362
b-4	5164	0	503	0	2207	2711	1725	1725	1256	2618	52%	1362
c-4	5006	0	507	0	1867	2374	1725	1725	1256	2618	52%	1362
d-4	4972	1	507	0	1876	2383	1725	1725	1256	2618	52%	1362
e-4	4947	1	507	0	1822	2329	1725	1725	1256	2618	52%	1362
f-4	4957	1	507	0	1845	2352	1725	1725	1256	2618	52%	1362
g-4	5026	1	507	0	1817	2325	1725	1725	1256	2618	52%	1362

Som det ses af beregningerne er opvarmningsbehovet sænket til mellem 5000 og 5200 kWh, i modsætning til ca. 9000 kWh ovenfor. Som forventet er varmetab mod jord og fundament stort set det samme som i de tidligere beregninger. Det skyldes, at gulvkonstruktionen er den samme, og at temperaturniveauet i gulvvarmeslangen er næsten den samme som for huset uden varmegenvinding.

4.2.1.2 Vurdering af beregninger

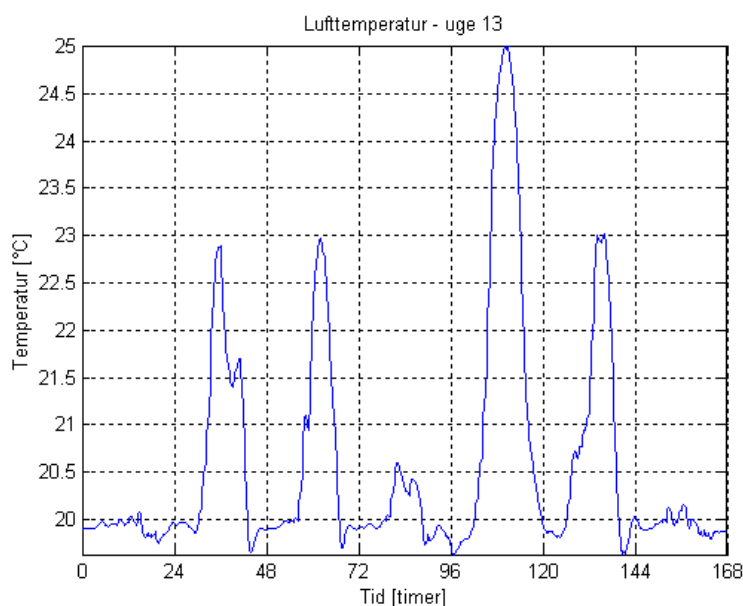
Kigges der på rumtemperaturen for grundsimuleringen fås følgende billede



Figur 4.1 Temperatur i hus fordelt over året

Som det ses, svinger temperaturen omkring 20 °C på årsbasis, med større værdier om sommeren, og perioder i vinterhalvåret, hvor temperaturen ikke kan opretholdes på den fastsatte setpunkttemperatur. Det ses også, at temperaturen i perioder er på 26 °C, som er den maksimalt tilladelige rumlufttemperatur, hvorefter der åbnes for vinduerne, og det antages, at temperaturen sænkes til 26 °C.

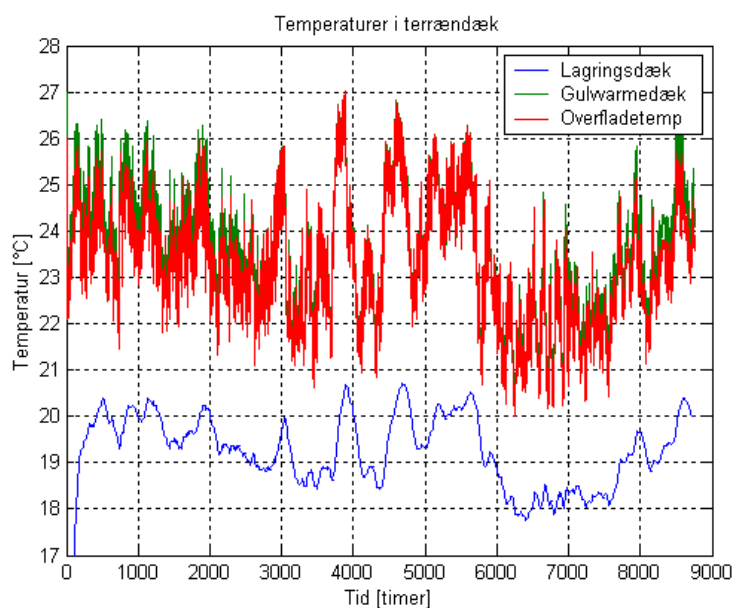
Kigges der på et forløb for rumtemperaturen i uge 13 (sidst i marts måned) fås:



Figur 4.2 Temperatur i hus i uge 13

Som det ses, er der en temperatur i huset på ca. 20 °C, og med en højere temperatur i dage med solindfald. Styringen af gulvvarmesystemet ses at fungere efter hensigten.

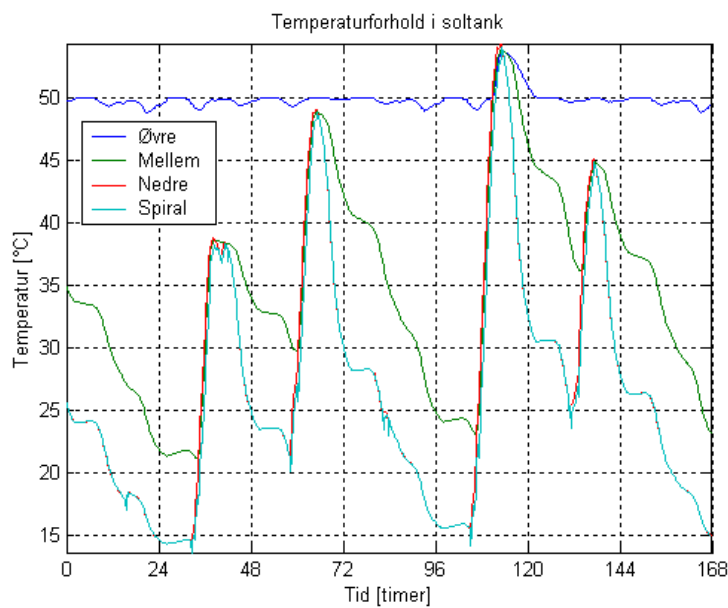
Temperaturforholdene i gulvet er vist på nedenstående figur:



Figur 4.3 Temperaturer i terrændæk

Temperaturen på overfladen og på gulvvarmedæk følges ad, med en lidt større værdi af gulvvarmedækket i fyringssæsonen, og stort set identiske temperaturer uden for fyringssæsonen. Temperaturen i lagringsdækket følger til en vis grad temperaturen i gulvvarmedækket. Igen er resultaterne som forventeligt.

Kigges der på forholdene i saltanken, fås følgende profil for temperaturen i de tre lag, samt i spiralen, som beregningsmæssigt udgør modellen for saltanken.



Figur 4.4 Temperaturforhold i soltank i uge 13

Temperaturen i den øvre del af soltanken er på omkring 50 °C eller derover i hele perioden. Der er en tydelig lagdeling i perioder, hvor der ikke tilføres varme til soltanken. Temperaturen i spiralen er stort set identisk med temperaturen af det nedre lag.

Samlet vurderes det at modellen giver resultater, der kan benyttes til de videre beregninger

4.2.2 Lager

I nedenstående tabel er vist beregningsresultaterne i det tilfælde, hvor al varme fra solfangeren sendes til varmelageret.

4.2.2.1 Beregningsresultater

Tabel 4.4 Beregningsresultater for den styring hvor al varme sendes i lageret i gulvet

Type	Q _{opv} [kWh]	Q _{sol,gulv} [kWh]	Q _{fund,ø} [kWh]	Q _{fund,n} [kWh]	Q _{jord} [kWh]	Q _{f+j} [kWh]	Q _{sol,tank} [kWh]	Q _{soltot} [kWh]	Q _{sup} [kWh]	Q _{tap} [kWh]	dæk- ning	nyttig [kWh]
a-4	8882	2599	549	559	2563	3671	0	2599	2608	2468	0%	445
a-8	8391	4558	565	582	3138	4385	0	4558	2608	2468	0%	936
b-8	8561	4508	557	628	3734	4919	0	4508	2608	2468	0%	534
c-8	8305	4599	572	690	2661	3924	0	4599	2608	2468	0%	1030
d-8	8746	5120	546	476	5142	6166	0	5120	2608	2468	0%	549
e-8	8710	4850	547	486	4878	5911	0	4850	2608	2468	0%	551
f-8	8703	5231	547	482	5096	6125	0	5231	2608	2468	0%	575
a-12	8008	6193	577	784	3612	4974	0	6193	2608	2468	0%	1319
c-12	7853	6147	588	767	2965	4320	0	6147	2608	2468	0%	1482
d-12	8542	6924	553	586	6352	7491	0	6924	2608	2468	0%	753
f-12	8504	6927	553	593	6288	7435	0	6927	2608	2468	0%	774
g-12	8024	6216	557	784	3597	4958	0	6216	2608	2468	0%	1340
a-16	7698	7592	587	869	4008	5464	0	7592	2608	2468	0%	1629

Indledningsvis kan det som forventet konstateres, at der er en reduktion, ved at benytte det nedre dæk i huset som varmelager for varmeafgivelsen fra solfangeren, samt at reduktionen forøges ved større solfangerarealer.

Betragtes resultaterne i sammenligning, med dem angivet i tabel 4.1, kan følgende konstateres. For det første kan det ses, at solfangeren afsætter en større effekt i gulvet, end den gjorde i soltanken – for typen a-4 er det ca. 2600 kWh mod ca. 1700 kWh for soltanken. Dette er meget naturligt, da der er en meget større varmekapacitet til rådighed i gulvet end i tanken, og dermed en meget større mulighed for afkøling af væsken, når den passerer gennem gulvet. Derudover kan det også konstateres, at varmetabet mod jord og fundament stiger væsentligt i forhold beregningerne hvor varmelagringen ikke benyttes, hvilket skyldes de højere temperaturer i gulvet.

Betragtes den nyttiggjorte effekt, kan det ved sammenligning med tabel 4.2 ses, at størrelsen her er meget mindre, selv om den i solfangeren optagne effekt er større.

Betragtes beregningsresultaterne for modellen med varmegenvinding, fås følgende resultater:

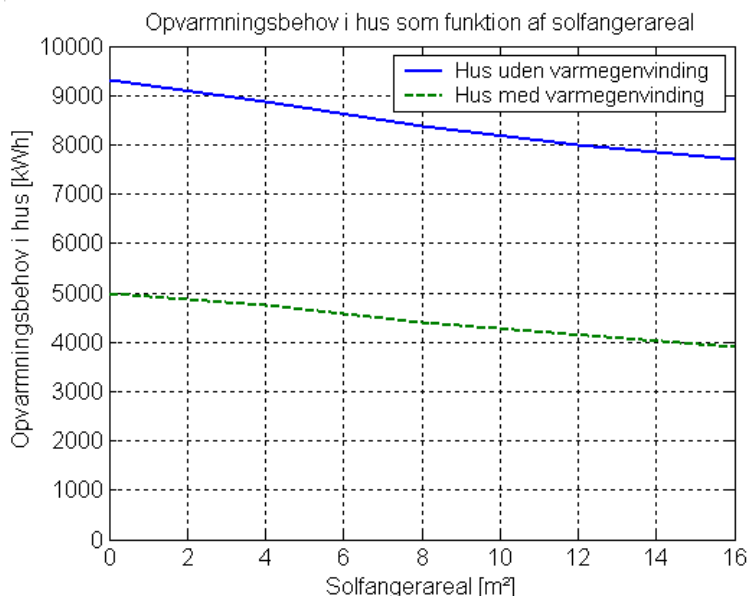
Tabel 4.5 Beregningsresultater for den styring hvor al varme sendes i lageret i gulvet. Hus med varmegenvinding

Type	Q _{pv} [kWh]	Q _{sol,gulv} [kWh]	Q _{fund,ø} [kWh]	Q _{fund,n} [kWh]	Q _{jord} [kWh]	Q _{f+j} [kWh]	Q _{sol,tank} [kWh]	Q _{soltot} [kWh]	Q _{sup} [kWh]	Q _{tap} [kWh]	dæk- ning	nyttig [kWh]
a-4	4757	2603	528	543	2489	3560	0	2603	2608	2468	0%	240
a-8	4415	4573	544	667	3067	4278	0	4573	2608	2468	0%	583
b-8	4601	4511	537	616	3657	4810	0	4511	2608	2468	0%	563
e-8	4611	4856	526	480	-4813	5819	0	4856	2608	2468	0%	336
f-8	4615	5128	526	476	-5022	6025	0	5128	2608	2468	0%	342
g-8	4425	4587	544	666	-3047	4257	0	4587	2608	2468	0%	601
b-12	4342	6184	549	709	-4219	5476	0	6184	2609	2468	0%	822
c-12	4027	6476	567	748	-2892	4207	0	6476	2609	2468	0%	979
d-12	4486	7039	532	581	-6297	7410	0	7039	2609	2468	0%	485
e-12	4470	6577	533	586	-5903	7021	0	6577	2609	2468	0%	477
f-12	4471	6923	533	588	6227	7347	0	6923	2608	2468	0%	486
g-12	4141	6232	556	771	3533	4860	0	6232	2608	2468	0%	885
a-16	3893	7744	566	856	-3947	5369	0	7744	2609	2468	0%	1105

Igen kan de samme forhold, som ovenfor beskrevet, genfindes for huset med det lave opvarmningsbehov.

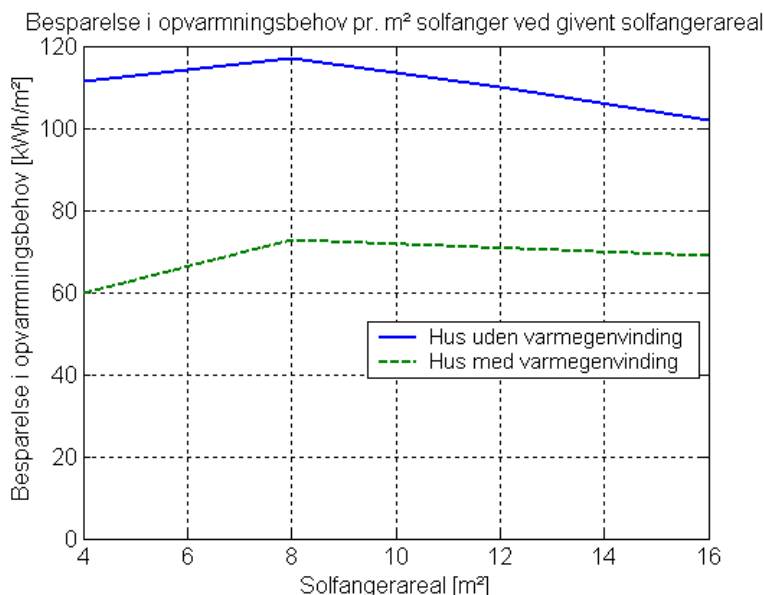
4.2.2.2 Reduktion for type a

Kigges der på type a, fås figur 4.5 og figur 4.6 for energiforbruget i huset som funktion af solfangerarealet, samt reduktionen i opvarmningsbehov pr. m² solfanger for forskellige solfangerarealer. Her er data vist for både huset med og uden varmegenvinding.



Figur 4.5 Opvarmningsbehov for type a som funktion af solfangerareal

Kigges på figur 4.5 ses det, at der er et faldende energiforbrug jo større solfanger der vælges, hvilket gælder for begge modeller. De største reduktioner i absolutte tal, er at finde for huset uden varmegenvinding, hvorimod den relative reduktion er størst for huset med varmegenvinding. Opvarmningsbehovet sænkes med ca. 1600 kWh i huset uden varmegenvinding når der benyttes 16 m^2 solfanger, eller omkring 17 %. I huset med varmegenvinding sænkes opvarmningsbehovet kun 1100 kWh, men det svarer til omkring 22 %.



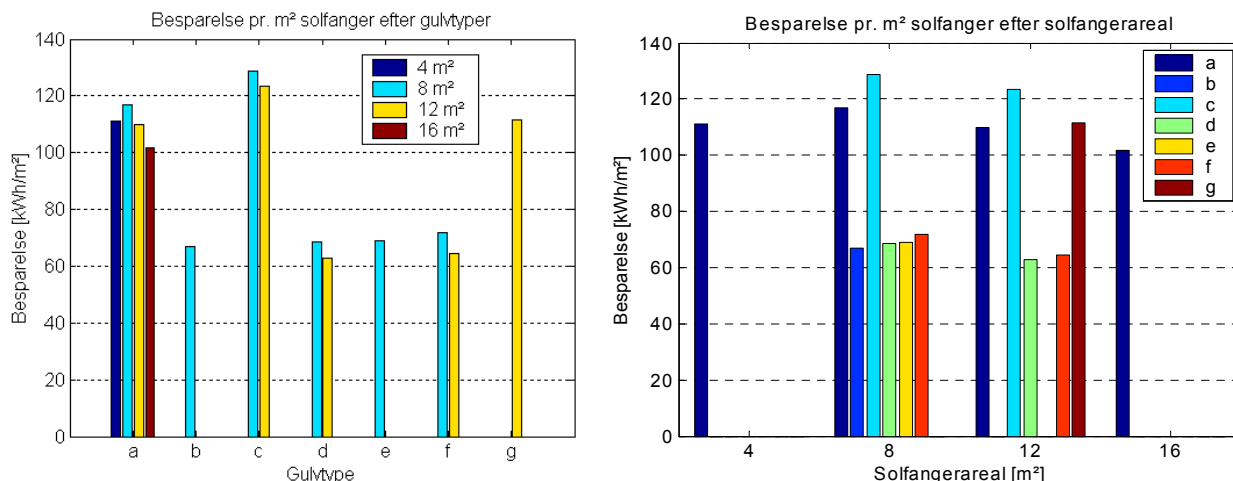
Figur 4.6 Reduktion i opvarmningsbehov i kWh pr. m^2 solfanger for type a, som funktion af solfangerareal

I figur 4.6, er reduktionen pr. m^2 solfanger vist for voksende solfangerarealer i hvert af de to huse. I begge tilfælde er der et maksimum i reduktionen pr. m^2 for et areal på 8 m^2 , men samtidig skal det nævnes, at begge kurver er ganske flade, hvilket betyder, at der stadig er reduktioner at hente, selv for store solfangerarealer. Det er dog uvist hvad der

sker når solfangerarealet bliver større end her angivet, så derfor vil en ekstrapolering af figurens data ikke nødvendigvis være sande.

4.2.2.3 Reduktioner for alle gulvtyper

Herefter betragtes reduktionen i opvarmningsbehov for alle typer, i forhold til opvarmningsbehovet for den samme type uden varmelagring, for at undersøge, hvilken gulvopbygning der er bedst egnet som varmelager. Resultatet er vist nedenfor.

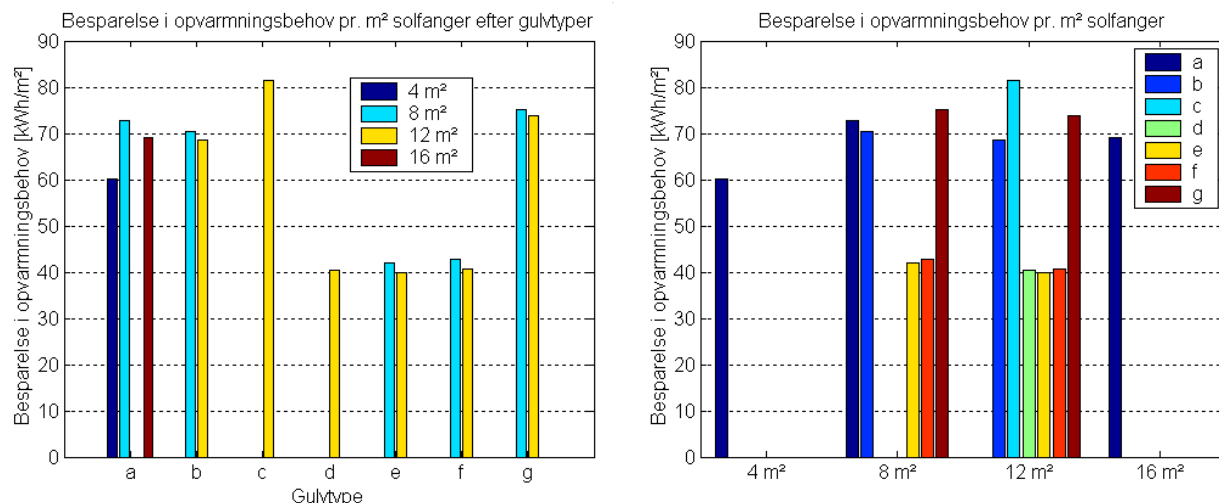


Figur 4.7 Reduktion i opvarmningsbehov pr. m² solfanger efter gulvtype og efter solfangerareal

Først skal det nævnes, at der desværre er "huller" i beregningsresultaterne. Det skyldes, at den opbyggede model i Simulink ikke altid har kunnet gennemføre en hel årssimulering. Dette er sket uden at det har været muligt at finde grunden hertil. Formentlig skyldes det, at tidsskridtet i simuleringen er blevet meget lille, grundet en pludselig ændring i forholdene i modellen, hvorved simuleringen stoppes. Samlet antages det at modellen, når den har gennemført en hel årssimulering, giver rigtige resultater, idet ingen beregningsstørrelser giver uheldige eller urealistiske værdier, og at resultaterne generelt er troværdige og brugbare.

Betragtes resultaterne fra beregningerne ses nogle generelle forhold. Der er en større reduktion i opvarmningsbehovet pr. m² solfanger ved 8 m² end ved 12 m². Der er forskel i reduktionens størrelse fordelt på gulvtype. Her skiller type c sig ud, som den gulvtype der giver mest reduktion pr. m² solfanger. Nedenfor i afsnit 4.2.2.4 til 4.2.2.7 sammenlignes de enkelte gulvtyper, og der drages konklusioner herudfra.

De tilsvarende beregninger for huset med varmegenvinding giver resultater på reduktionen pr. m² der er cirka to-tredjedele af den reduktion der opnås i huset uden varmegenvinding, hvilket vises på figur 4.8 nedenfor.



Figur 4.8 Reduktion pr. m² solfanger efter gulvtype og efter solfangerareal – hus med varmegenvinding

Det skal samtidig bemærkes, at det er de samme forhold der gør sig gældende mht. til fordelingen af reduktionerne, forstået på den måde, at type c giver en større reduktion end type a, samt at reduktionen er større pr. m² for 8 m² end for både 4 m² og 12 m² (og 16 m²).

I det følgende kigges der på forholdene for de forskellige gulvtyper. Der tages udgangspunkt i forholdene for huset uden varmegenvinding, idet forskellene her er tydeligst. Det er dog generelt de samme forhold, der gør sig gældende for huset med varmegenvinding, blot i mindre målestok.

4.2.2.4 Isoleringstykkelse mellem dæk

Kigges der på de enkelte typer, kan det ses, at der er forskel i den opnåede reduktion. Generelt er det sådan, at jo mindre isoleringstykkelsen mellem de to dæk er, jo større er reduktionen i opvarmningsbehov. Dette kan ses i type c, a og d, hvor isoleringstykkelsen mellem de to dæk er hhv. 5 cm, 10 cm og 25 cm. I tabel 4.6 er angivet ydelsen af solfangeren (for 8 m²), varmetab mod jord, samt reduktionen i opvarmningsbehov angivet for de tre typer.

Tabel 4.6 Reduktion i opvarmningsbehov for type c, a og d ved 8 m² solfangerareal

	Type c	Type a	Type d
Isolering mellem dæk (mm)	50	100	250
Ydelse af solfanger [kWh]	4599	4558	5120
Varmetab mod jord og fundament [kWh]	3924	4385	6166
Reduktion [kWh]	1030	936	549

Som det ses af tabellen er solfangerydelsen stort set ens for type c og a, mens den er ca. 500 kWh større for type d, men det skal sammenholdes med, at varmetabet mod jord og fundament er langt større for type d. Samlet kan det ses, at reduktionen i rumopvarmningen med 8 m² solfanger er mellem 550 kWh og 1030 kWh. I de her angivne reduktioner og varmetab er der ikke taget højde for det termiske indeklima i huset, hvilket gøres nedenfor.

4.2.2.5 Lagertykkelse

Kigges der på lagertykkelsen, kan type a og g sammenlignes. Her er den eneste forskel, at lageret i type g er på 300 mm, mod 100 mm i type a. Kigges der på data for 12 m² sol-

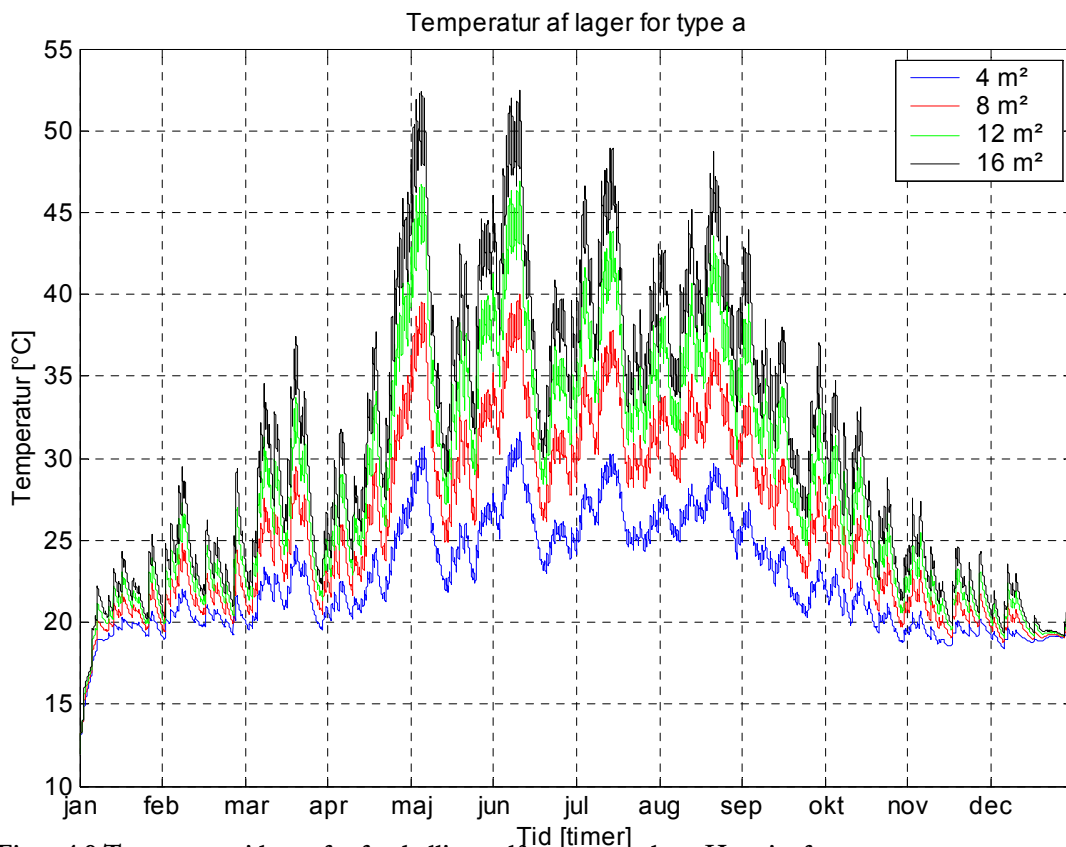
fanger (hvor det må forventes, at det store lager vil have en fordel, på grund af større varmekapacitet), kan det ses, at opvarmningsbehovet for huset i begge tilfælde er på omkring 8000 kWh. Det kan derfor konkluderes, at ved en lagertykkelse på 100 mm er varmekapaciteten af dækket stort nok til at lagre al varme fra solfangeren, hvorved en forøgelse af lagertykkelsen ikke har nogen effekt.

4.2.2.6 Sandlager

Der er i type e og f opbygget to identiske modeller med hhv. sand og beton som nedre dæk. I begge tilfælde er der en isoleringstykkelse på 250 mm mellem de to dæk, og en tykkelse af det varmelagrende dæk på 300 mm. De to typer har et stort set identisk opvarmningsbehov ved 8 m² solfangerareal på ca. 8700 kWh. Der afsættes ca. 400 kWh mere i betonlageret end i sandlageret, men det opvejes til dels af et større varmetab gennem fundament og jord på ca. 200 kWh. At regnestykket ikke går op, skyldes, at der er forskellige temperaturfordelinger i rummet, havde varmeafgivelsen hertil været medtaget, ville der være overensstemmelse mellem tallene. Det kan derfor konkluderes, at der ikke er nogen forskel på at benytte sand og beton som varmelagrende medium.

4.2.2.7 Temperatur i lager

Temperaturen i lageret er vist for type a på nedenstående figur 4.9, for forskellige størrelser af solfangeren.



Figur 4.9 Temperatur i lager for forskellige solfangerstørrelser. Her vist for type a

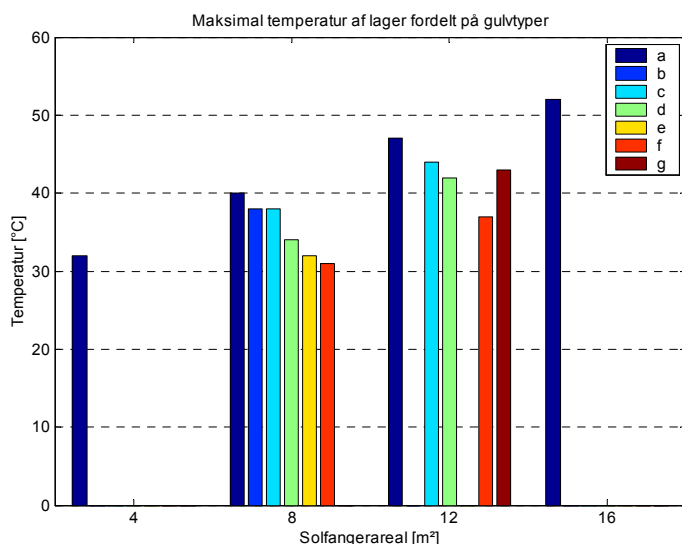
Som det ses, bliver temperaturen for de store solfangerarealer høj om sommeren, for 16 m² når den over 50 °C, mens den for 12 m² når op over 45 °C.

Generelt kan det siges, at lagertemperaturen følger samme udvikling for alle gulvtyper og solfangerarealer, dog selvfølgelig med en forskellig ”grundtemperatur” om vinteren, afhængig af fordelingen af isoleringen i de to lag isolering. I nedenstående tabel vises den maksimale temperatur af lageret, samt den temperatur lageret har om vinteren (cirka-værdi)

Tabel 4.7 Maksimal- og vintertemperatur af lager i de forskellige typer. (Lagertemperatur om vinteren først taget efter indsvingningen er overstået)

Type	Tmax [°C]	Tvinter [°C]	Type	Tmax [°C]	Tvinter [°C]
a-4	32	20	a-12	47	20
a-8	40	20	c-12	44	21
b-8	38	18	d-12	42	19
c-8	38	22	f-12	37	18
d-8	34	18	g-12	43	20
e-8	32	18	a-16	52	20
f-8	31	18			

Betragtes den maksimale temperatur for de forskellige gulvtyper i et søjlediagram, fås følgende

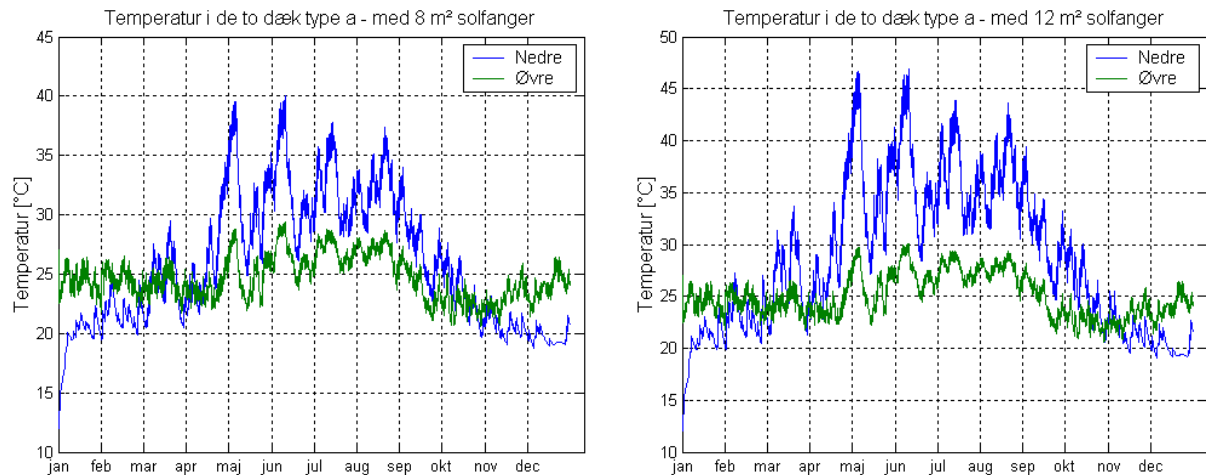


Figur 4.10 Maksimaltemperatur af lager for de forskellige gulvtyper

Lagertemperaturen bliver størst for type a, som er den af lagertyperne der har den mest ligelige fordeling af isolering, og dermed også det mindste varmetab. Forskellen mellem type a og g kan ved 12 m² aflæses til ca. 4 K, idet lageret i type g har en større varmekapacitet.

Samme forhold gør sig i øvrigt gældende for huset med varmegenvinding, hvor maksimaltemperaturerne i lageret er stort set identiske med dem, der er angivet her, for huset uden varmegenvinding, hvilket grundet gulvets opbygning til dels kunne forventes.

Dernæst betragtes temperaturen i de to dæk for type a ved hhv. 8 m² og 12 m².



Figur 4.11 Temperaturforhold i de to dæk for type a med 8 og 12 m² solfanger

Det ses, at hvor temperaturen for det øvre dæk er stort set konstant over året, er der som forventet større udsving for det nedre dæk. Figuren kan benyttes til at vurdere, hvorvidt det er muligt at hente varme fra det nedre lager op i det øvre dæk, ved aktivt at benytte væsken i slangerne som varmecørende medium. Dette er i modsætning til varmeledning, som det er tilfældet i den passive varmeoverførsel, der benyttes her. Det ses, at der i nogle perioder af året (sent forår og tidligt efterår) vil være mulighed for at udnytte en temperaturforskel mellem de to lag. Men generelt er der tale om en lille temperaturforskel på højst 5 K for 12 m² solfanger. Det vurderes derfor, at det ikke vil give et udbytte, aktivt at hente varme op mellem de to dæk.

Samme forhold omkring temperaturerne i de to dæk, gør sig gældende for huset med varmegenvinding.

4.2.2.8 Temperaturforhold i rum og på gulvoverflade

Et af de problemer der vil opstå, når der lagres varme i gulvet på et hus er, at der om sommeren kan komme for høje temperaturer på gulvoverfladen, som dels gør gulvet ubehageligt at opholde sig på, og dels giver forhøjet lufttemperatur i huset.

I beregningerne er der sat en øvre grænse på lufttemperaturen på 26 °C, hvorefter det antages at der luftes ud, så temperaturen sænkes til netop denne grænse.

Overfladetemperaturen på gulvet er en anden størrelse, der er interessant at kigge på. Der er generelt vide rammer for en acceptabel overfladetemperatur af gulvet, afhængig af fodbeklædning og gulvbelægning. Med fodtøj giver en temperatur mellem 19 °C og 29 °C færre end 10 % utilfredse, mens en person med bare fødder, og en belægningen af klinker, er det komfortable temperaturinterval mellem 27 °C og 30 °C, ifølge [Danvak]. Dog kan det allerede ved ca. 24 °C mærkes, at der er varme på gulvet, hvorved denne temperatur regnes for den nedre komfortgrænse.

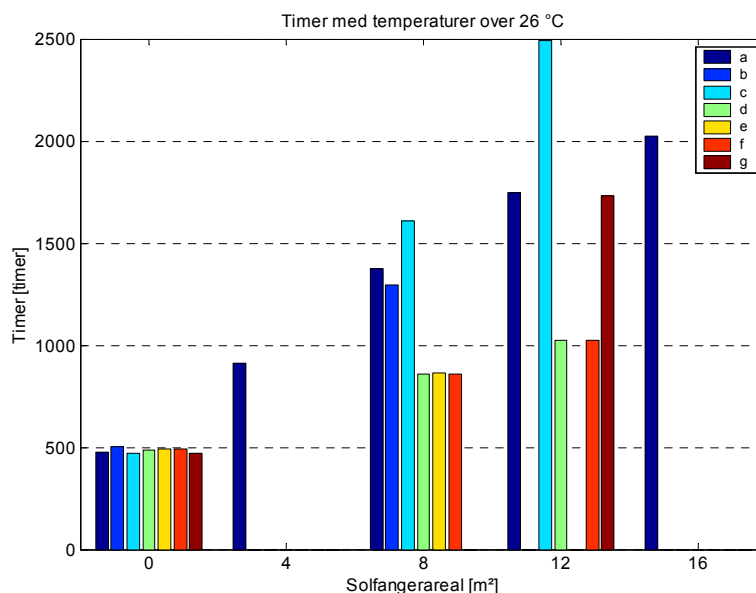
Kigges først på antallet af timer med en lufttemperaturer på 26 °C eller derover, samt over 25 °C, fås følgende værdier for de enkelte beregninger

Tabel 4.8 Antal timer med temperaturer over hhv. 26 °C og 25 °C, for 0, 4, 8 og 12 m² solfanger

type	T>26 °C	T>25 °C	type	T>26 °C	T>25 °C	type	T>26 °C	T>25 °C
a-0	474	913	a-4	912	1550	a-12	1750	2429
b-0	504	954	a-8	1375	2048	c-12	2493	2679
c-0	473	908	b-8	1293	1878	d-12	1025	1665
d-0	486	925	c-8	1607	2278	f-12	1024	1688
e-0	492	934	d-8	858	1465	g-12	1732	2449
f-0	491	931	e-8	866	1483	a-16	2023	2676
g-0	473	911	f-8	861	1479			

Som det kan ses, er der i modellen et stort antal timer med overtemperaturer, allerede i modellen uden varmetilførsel til varmelageret, hvilket skyldes, at der er et relativt højt solindfald, og en godt isolerende klimaskærm. Med i billedet skal også, at der ikke i beregningerne antages nogen former for solafskærmning, hvilket der i form af fx gardiner typisk vil være til stede i et hus.

De samme data er afbilledet på figur 4.12, dog kun for lufttemperaturer over 26 °C



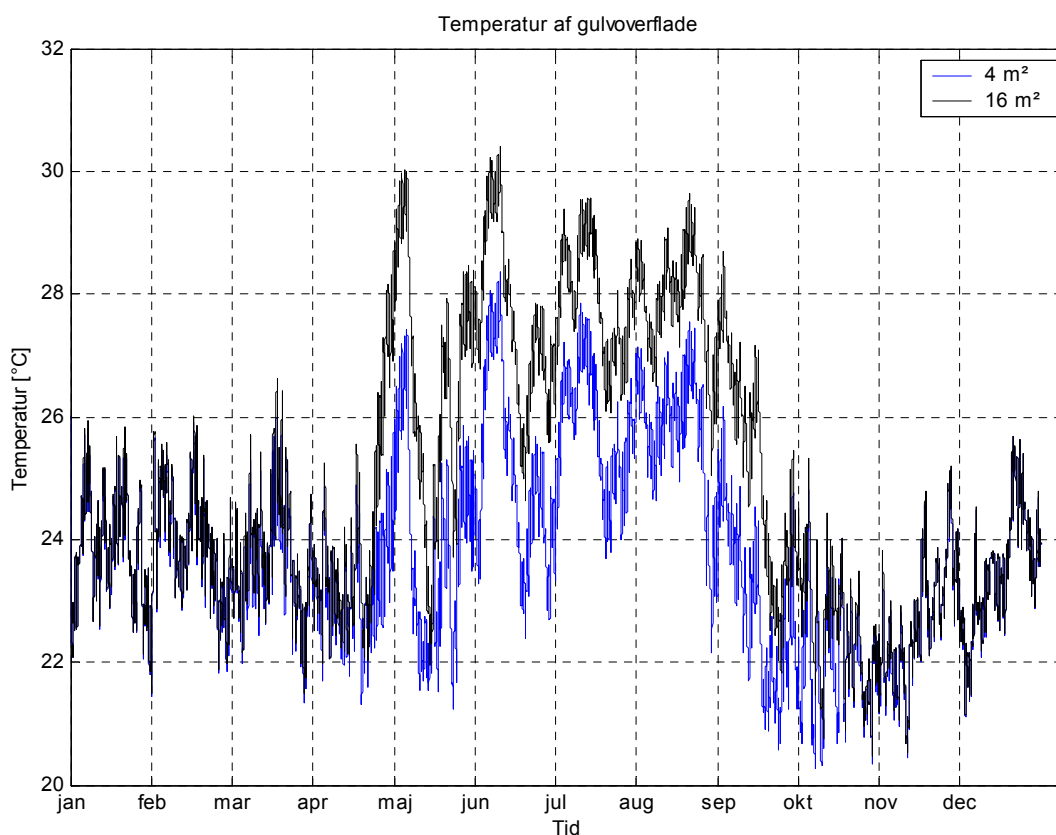
Figur 4.12 Timer med temperaturer over 26 °C i de forskellige gulvtyper ved forskellige solfangerarealer

Det ses, ikke overraskende, at de modeller hvor der er en lille isoleringstykkelse mellem de to dæk (især type c), er der mange timer med høj temperatur. Dette skyldes, at der er en større varmeafgivelse fra lageret mod rummet. Det ses også, at når der er stor isoleringstykkelse (type d, e, f og g), slår antallet af timer med overtemperatur ikke igennem på samme måde, men som beskrevet tidligere, opnås der ikke samme reduktion med disse typer gulvopbygning.

Det skal dog nævnes, at hvis blot temperaturen i rummet holdes omkring 26 °C, vil personer i almindelig sommerbeklædning ikke synes det er ubehageligt varmt, jf. fx [Danvak].

I huset med varmegenvinding antages det, at varmegenvindingsenheden ikke kører om sommeren, hvorved antallet af timer med temperaturer over 26 °C stort set er det samme, som i huset uden varmegenvinding.

Der kigges dernæst på overfladetemperaturen af gulvet i for type a, ved hhv. 4 m² og 16 m², hvilket er vist på figur 4.13.



Figur 4.13 Overfladetemperatur af gulv

Som det ses er den maksimale overfladetemperatur af gulvet omkring 28 °C for 4 m², og ca. 30 °C for 16 m². Temperaturen på gulvoverfladen bliver altså ikke ubehagelig varm. Dette gør sig i øvrigt også gældende for type c med 12 m² solfanger, der har flest timer med lufttemperaturer over 26 °C. De her fundne temperaturer for overfladen er højere end hvad der ønskes af komfortensyn samt holdbarhed af gulvbelægningen², hvis gulvvarmeanlægget blev benyttet.

Samlet kan det siges, at overfladetemperaturer på omkring 24 °C til 26 °C er en fordel, idet folk ellers vil tænde for gulvvarmeanlægget, for at sikre en komfortabel temperatur af klinkebelagte rum. Dette forhold diskuteres yderligere nedenfor i afsnittet om anbefalinger.

4.2.3 Parallelstyring

Der kigges herefter på en model hvor soltank og lager er koblet i parallel, hvor fremløbstemperaturen afgør om varmen skal sendes i lageret eller i tanken. Der er foretaget beregninger hvor fremløbstemperaturer fra solfangeren under setpunkttemperaturen sendes i soltanken, og over setpunkttemperaturen sendes i lageret.

I dette afsnit gøres der ikke så meget ud af temperaturforhold, og der fokuseres udelukkende på ydelsen af anlægget.

² Trægulve må ikke udsættes for overfladetemperaturer på over 27 °C

Tabel 4.9 Resultater ved paralleldrift med skift ved T_{skift}

Typ	Tskift [°C]	Qopv [kWh]	Qsol,gulv [kWh]	Qfund,ø [kWh]	Qfund,n [kWh]	Qjord [kWh]	Qf+j [kWh]	Qsol,tank [kWh]	Qsoltot [kWh]	Qsup [kWh]	Qtap [kWh]	dæk- ning	nyttig [kWh]
a-4	27	9146	1458	544	514	2352	3410	1275	2733	1977	2485	20%	689
a-8	27	8649	3922	562	647	2973	4184	1092	5014	1990	2485	20%	1173
a-8	60	9367	1051	539	472	2156	3168	2579	3630	990	2630	62%	1600
b-8	27	8797	3902	554	594	3528	4676	1156	5058	1977	2486	20%	807
b-8	60	9471	1051	533	432	2548	3512	2589	3640	991	2630	62%	1263
c-8	27	8603	3921	568	664	2561	3794	1138	5059	1971	2485	21%	1246
c-8	60	9444	1033	541	538	2067	3195	2619	3652	989	2631	62%	1533
d-8	27	8905	4102	544	422	4538	5504	1259	5361	1938	2487	22%	939
e-8	27	8857	4036	545	434	4361	5343	1243	5279	1934	2488	22%	958
e-8	60	9220	1164	525	251	2473	3260	2609	3773	991	2629	62%	1679
f-8	27	8874	4127	545	427	4494	5466	1264	5391	1927	2487	23%	964
f-8	60	9230	1057	535	244	2519	3297	2594	3651	990	2629	62%	1687
g-8	27	8645	3957	562	645	2949	4157	1086	5043	2001	2485	19%	1203
a-12	27	8233	5935	576	758	3493	4827	1087	7022	2053	2483	17%	1524

Der er i beregningerne brugt to setpunktstemperaturer for omslaget mellem soltank og lager, én lav på 27 °C og én høj på 60 °C. Det har i denne sammenhæng betydet, at anlægget stort set har opført sig som enten en ”ren” soltank, der kan komme af med overskudsvarmen til gulvet, svarende til den høje setpunktstemperatur, eller som et ”rent” lager, der afleverer noget af varmen til soltanken.

Som det ses af tabel 4.9 er der stor forskel i den samlede ydelse af anlægget, Q_{soltot} , afhængig af styringsformen. I det tilfælde hvor anlægget køres til soltank med overskud til lageret, yder anlægget på 8 m² omkring 3500 kWh, hvorimod det yder omkring 5000 kWh, når varmen primært sendes til lageret. Reduktionen af opvarmningsbehovet er ikke i nogen af tilfældene særlig stort, højst ca. 600 kWh (1000 kWh for 12 m²) når der primært sendes varme til lager. Når der primært sendes varme til tanken, er der ingen reduktion i opvarmningsbehovet, hvilket skyldes, at lageret ikke varmes nok op til at kunne nedsætte varmetabet fra det øvre dæk.

Denne styringsform giver altså, uanset hvilken temperatur der skiftes mellem lager og tank, ingen eller kun en meget lille reduktion af opvarmningsbehovet i huset. Men samtidig er det dog klart, at styringsformen giver et højere udbytte, end ved enten at sende varmen direkte i lageret eller direkte i tanken, hvilket kan ses ud fra den nyttiggjorte varme.

4.2.4 Serielstyring

Den serielle styringsform er den, der umiddelbart kan forventes at give de bedste resultater for anlægget. Grunden hertil er, at soltanken får første prioritet, idet det er her de største økonomiske gevinster findes. Al overskydende varme, eller varme der ikke kan afsættes i soltanken, kan dernæst afsættes i lageret i gulvet.

Desværre har det ikke været muligt at få modellen til at gennemføre årsberegninger – af årsager der ikke kunne spores i modellen i Simulink. Grunden til at modellen er stoppet, er, at der opstår meget små tidskridt, formentlig i forbindelse med beregningen af temperaturforholdene i styringsdelen af modellen. Det skal understreges, at beregningsresultaterne er fuldt ud brugbare ind til programmet stoppes.

I tabel 4.10 og tabel 4.11 er beregningerne vist for den serielle kobling, sammenlignet med de styringer hvor al varme sendes til soltanken eller i gulvet. I begge tilfælde er der foretaget beregninger til cirka midt på året. Resultaterne er vist til den time hvor den serielle styring, der er nået kortest er nået til.

Alle resultater er angivet for huset uden varmegenvinding. Den nyttiggjorte varme vises ikke i disse tabeller.

Tabel 4.10 Sammenligning for serielstyring. Type a med 4 m² solfanger med beregning til time 4880 i året

Type	Qopv [kWh]	Qsol,gulv [kWh]	Qfund,ø [kWh]	Qfund,n [kWh]	Qjord [kWh]	Qf+j [kWh]	Qsol,tank [kWh]	Qsoltot [kWh]	Qsup [kWh]	Qtap [kWh]	dækning [%]
seriel	5569	1210	331	322	1366	2020	523	1733	1047	1384	24%
soltank	5730	0	322	0	1106	1429	1145	1145	643	1481	57%
gulv	5457	1618	334	345	1471	2150	0	1618	1450	1373	0%

Som det ses af tabel 4.10 lægger resultatet fra den serielle styring sig mellem de to øvrige hvad angår opvarmningsbehov. Reduktionen af opvarmningsbehovet er mindre, end når al varme sendes i lageret, og samtidig opnås der et mindre dækningsbidrag. Det skal dog ses i lyset af et lille solfangerareal.

I tabel 4.11 er beregningen foretaget for 8 m² solfanger.

Tabel 4.11 Sammenligning for serielstyring. Type a med 8 m² solfanger med beregning til time 4880 i året

Type	Qopv [kWh]	Qsol,gulv [kWh]	Qfund,ø [kWh]	Qfund,n [kWh]	Qjord [kWh]	Qf+j [kWh]	Qsol,tank [kWh]	Qsoltot [kWh]	Qsup [kWh]	Qtap [kWh]	dækning [%]
seriel	5278	2354	340	392	1693	2425	659	3013	924	1388	33%
soltank	5730	0	322	0	1106	1429	1515	1515	465	1684	72%
gulv	5157	2819	343	419	1819	2581	0	2819	1450	1373	0%

Med 8 m² solfanger ses det, at den serielle styring har en større reduktion i opvarmningsbehovet, samtidig med en større afsat effekt i soltanken, end for 4 m².

Sammenlignes resultatet fra styringen hvor al varme sendes i gulvet med den serielle styring, er der dog en næsten lige så stor reduktion af rumopvarmningen, samtidig med at der også opnås et ikke uvæsentligt bidrag til det varme brugsvand. Styringen giver altså den største effekt på rumopvarmningen, men derudover er der en gevinst på det varme brugsvand.

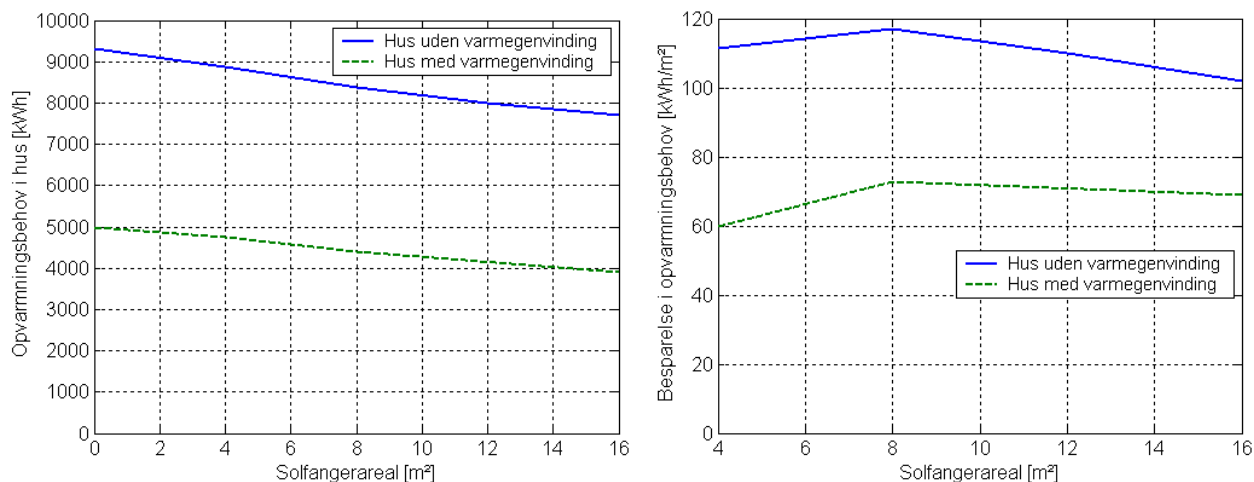
Ønskes i stedet en større dækningsgrad, kunne en alternativ metode være, kun at sende en del af flowet serielt igennem gulvet, for på den måde at holde temperaturen højere i væske kredsen, med en større dækningsgrad af det varme brugsvand til følge.

Samlet er der dog for den serielle styring, en klar fordel i forhold til når al varme sendes i gulvet.

5 Dimensioneringsdiagrammer

I dette kapitel laves der en opsamling af de resultater, der er opnået i kapitel 4. Nogle af figurerne er gentaget, men de samles her, for at der kan gives et samlet billede af betydningen af de parametre der er undersøgt.

Som udgangspunkt vises opvarmningsbehovet i de to modeller der er foretaget beregninger for. Derudover vises reduktionen i opvarmningsbehovet ved et givent solfangerareal pr. m² solfanger også for begge modeller.



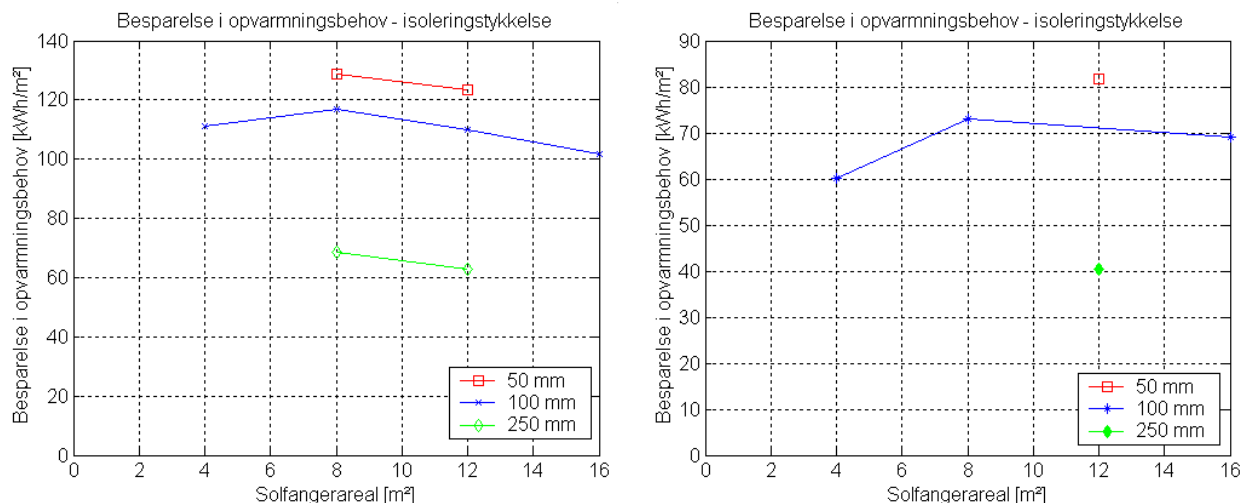
Figur 5.1 Opvarmningsbehov (til venstre) og reduktionen pr. m² solfanger (til højre) for gulve af type a med forskellige solfangerarealer

Der vises herefter nogle sammenligninger mellem de forskellige typer. I alle figurer vises der to grafer for den opnåede reduktion af opvarmningsbehovet som funktion af solfangerarealet. Til venstre vises reduktionen i huset uden varmegenvinding, der opfylder kravene til det nuværende bygningsreglement, og til højre vises huset med varmegenvinding, der opfylder kravene til det kommende bygningsreglement. Data er enten vist som enkeltpunkter (hvis der kun er beregning for et solfangerareal), eller som kurver, hvis der er mere end et punkt. I alle tilfælde vises beregningspunkterne. Der tages i disse figurer ikke højde for de termiske forhold i huset. Der henvises til de forrige afsnit i resultatkapitlet for uddybning.

I alle tilfælde skal potentialet sammenholdes med et opvarmningsbehov på omkring 9000 kWh for huset uden varmegenvinding og omkring 5000 kWh for huset med varmegenvinding. I alle de angivne beregninger skal man være opmærksom på værdierne på y-aksen, især skal det noteres, at kurverne er flade.

5.1.1 Isoleringstykkelsen mellem lager og gulvvarmedæk

Der sammenlignes mellem type a, c og d. De tre typer har hhv. 50 mm, 100 mm og 250 mm isolering mellem de to dæk. Den totale isoleringstykkelse er i alle tre tilfælde 300 mm, hvorved den resterende isoleringstykkelse er anbragt under lageret.

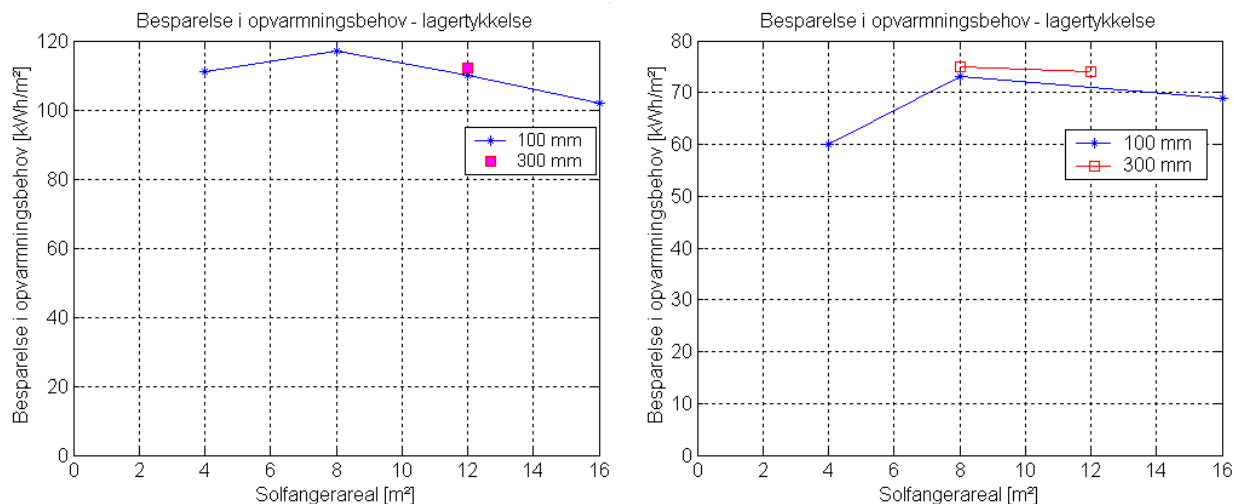


Figur 5.2 Potentiale for reduktion af opvarmningsbehov ved forskellige isoleringstykkelser mellem de to dæk som funktion af solfangerarealet. Figuren til venstre viser huset uden varmegenvinding, og til figuren højre viser huset med varmegenvinding

Det ses, at ydelsen af anlægget er større jo mindre isolering der er mellem de to dæk. Her skal man dog være opmærksom på, at antallet af timer med temperaturer over 26 °C vokser voldsomt, jo mindre isoleringstykkelser mellem de to lag er.

5.1.2 Lagertykkelse

Lagertykkelsens betydning for reduktionen af opvarmningsbehovet angives i figur 5.3. Der sammenlignes mellem type a og g, som har lagertykkelser på hhv. 100 mm og 300 mm.

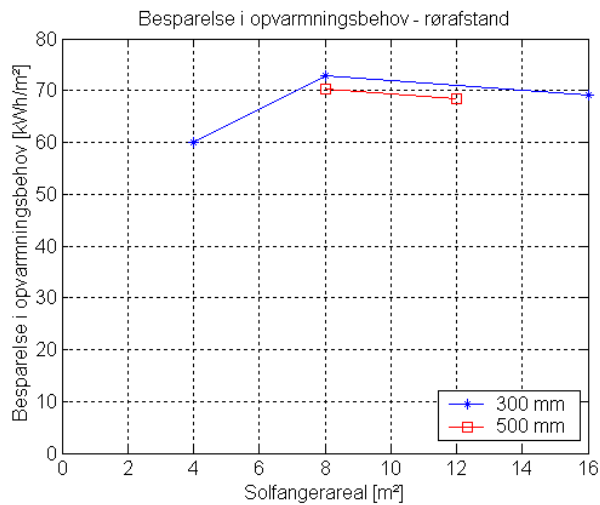


Figur 5.3 Potentiale for reduktion af opvarmningsbehov ved forskellige lagertykkelser som funktion af solfangerarealet. Figuren til venstre viser huset uden varmegenvinding, og til figuren højre viser huset med varmegenvinding

Som det ses, er der meget lille forskel i den opnåede reduktion mellem de to lagertykkelser, hvilket indikerer, at lageret i alle tilfælde kan optage den afsatte varme fra solfangeren.

5.1.3 Rørafstand

Der sammenlignes mellem type a og b, der har en rørafstand på hhv. 300 mm og 500 mm. Data kun vist for huset med varmegenvinding.

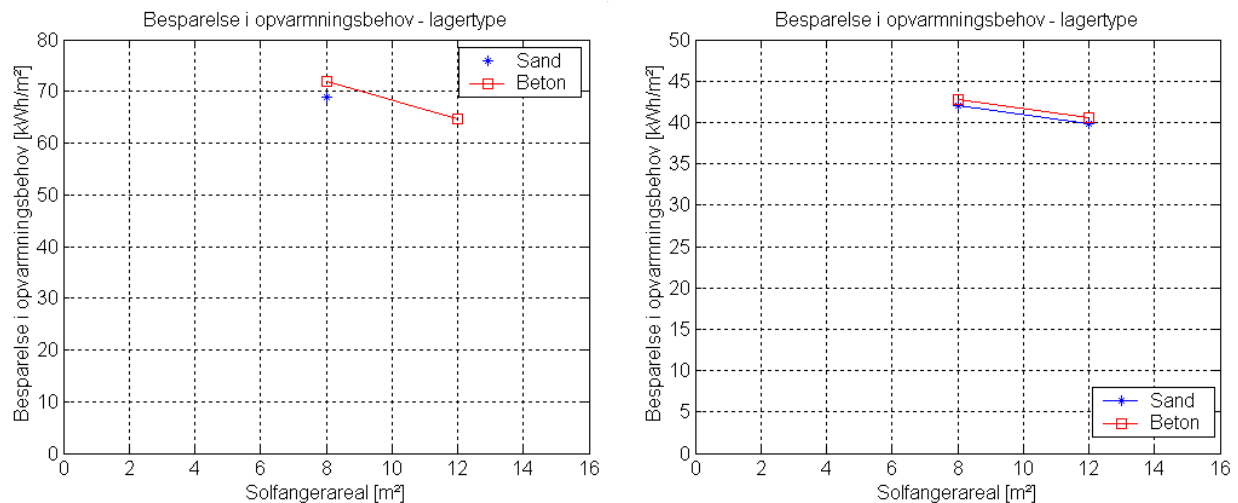


Figur 5.4 Potentiale for reduktion af opvarmningsbehov ved forskellige rørafstande som funktion af solfangerarealet. Data kun vist for huset med varmegenvinding

Som det ses, er der en lidt lavere ydelse ved en større rørafstand for huset med varmegenvinding. Men potentialet er stort set uafhængigt af rørafstanden her.

5.1.4 Lagertype

Til denne sammenligning benyttes type e og f. I begge tilfælde er der et lager med en tykkelse på 300 mm. Den ene lager er udført i sand og det andet i beton.



Figur 5.5 Potentiale for reduktion af opvarmningsbehov ved forskellige lagertyper som funktion af solfangerarealet. Data kun vist for huset med varmegenvinding

Der ses kun marginale forskelle i reduktionen af opvarmningsbehovet, afhængigt af om der benyttes sand eller beton i varmelageret.

6 Økonomi

6.1 Forudsætninger

Ved paralleldrift udnyttes solenergien både til opvarmning af brugsvand og til opvarmning af lager under gulv. Der er udført beregninger med en setpunktstemperatur 27 °C for omslag imellem levering til soltank og lager.

Tænkes et solfangerareal svarende til et standard anlæg til opvarmning af brugsvand udnyttet fuldt ud i sommermånederne, vil der i forår og efterårs månederne kunne suppleres med varme fra et yderligere solfangerareal, som samtidig udnytter lagring af varme under gulv.

Beregningerne som er udført med paralleldrift, er angivet i tabel 4.9 og viser hvilken fordeling, der kan være ved den givne styring mellem nyttiggjort varme til brugsvand og til dækning af opvarmningsbehovet. Dækningsgraden til opvarmning af brugsvand er 21 % svarende til 514 kWh for et 8 m² supplerende solfangerareal og den udnyttede varme fra lager er 1246 kWh.

For at vurdere anlægsudgifterne til et varmelager angives følgende forudsætninger: Firmaet Aidt Miljø A/S har stor erfaring med solvarmeanlæg til rum og brugsvandsopvarmning med integrerede varmelagre. Varmelagrene består fortrinsvis i sandlagre placeret under gulv.

Timeforbruget til udlægning af varmeslanger i lageret er derfor sat til 6 timer, på baggrund af erfaringer fra projekter som Aidt Miljø har udført [Heller 96]. Bruttomaterialepriser er taget fra "V&S Byggedata husbygning –Brutto 2001". Prisen for Pex-rør er taget fra internettet [Handyman], som angiver en pris for 120 m rør til 691.2 kr., hvilket giver en pris pr. m² på 17,28 kr. Alle priser er eksklusiv moms.

Pex-rør	17,28 kr./m ²	[Handyman]
Armeringsnet	14,80 kr./m ²	[V&S] side 234
Solfanger supplerende m ²	1500,00 kr./m ²	[Heller] angiver 1000,00kr./m ²
Fittings og tilbehør	1500,00 kr.	

For et lager med et samlet areal på 129 m² svarende til hele huset er ekstraudgifterne for gulvet beregnet som følger:

6 timer	Arbejds løn	225 kr./time	1.350,00 kr.
129 m ²	Pex-rør á	17,28 kr./m ²	2.229,00 kr.
129 m ²	Armeringsnet á	14,80 kr./m ²	1.909,00 kr.
8 m ²	Solfanger supplerende á	1500,00 kr./m ²	12.000,00 kr.
	Fittings og tilbehør		1.500,00 kr.
Samlede anlægsudgifter til integreret solvarme			17.788,00 kr.

Denne pris lægges til grund for analysen af systemets økonomi.

6.2 Analyser

Energiprisen bruges til at beregne den reduktion i opvarmningsbehovet som solvarmeanlægget giver anledning til. Derfor er prisen i almindelighed den marginale pris for produceret varme med det pågældende anlæg. For kedler beregnes denne ud fra bruttoenergiprisen i kr./kWh, her kaldet brændselsprisen.

Ved fjernvarme anføres normalt 100 % fyringsnyttevirkning, og den anførte pris skal være den marginale pris, svarende til den reelle besparelse (eksklusiv tilslutningsafgift) ved en nedsættelse af forbruget.

Energiprisen for naturgas er 6,54 kr./m³ og naturgassen har et energiindhold på 3,96 MJ/m³. Til dækning af varmebehovet er energi prisen udregnet til 0,59 kr./ kWh.

NESA's normaltarif er for august måned 2001 sat til 139,42 øre/kWh.

Der indgår energipris til dækning af varmebehovet med det konventionelle varmeanlæg. Til opvarmning af brugsvand benyttes en energipris svarende til NESA's normaltarif. Det må desuden forventes at prisen for sparet kWh stiger i takt med at energibehovet til huset mindskes idet anlægsudgifter til varmeanlæg bliver betydningsfuldt.

Den årlige ydelse fra solvarmeanlægget er 1246 kWh fordelt med 521 kWh til opvarmning af brugsvand og 725 kWh til reduktion af varmebehovet. Den årlige besparelse er 1197 kr./år.

Til finansiering af anlægget er der valgt et annuitetslån med 4 terminer om året. Nedenfor i tabel 6.1 er lånets udvikling i løbetiden vist inklusive besparelserne fra solvarmeanlæggets reduktion af energiodgifterne.

Tabel 6.1 Udviklingen af et annuitetslån med fire terminer til dækning af integreret solvarmelagers drift og anlægsudgifter

År	Restgæld	Afdrag	Renter	Ydelse på lån	Driftsomkostninger	Sparet skat	Besparelse	Likviditet
1	19489	477	1385	1863	60	693	1189	-40
2	18977	512	1351	1863	62	675	1224	-26
3	18429	548	1314	1863	64	657	1261	-8
4	17841	588	1275	1863	66	637	1299	7
5	17211	630	1233	1863	68	616	1338	23
6	16536	675	1187	1863	70	594	1378	40
7	15813	724	1139	1863	72	569	1419	53
8	15037	776	1087	1863	74	543	1462	68
9	14205	831	1031	1863	77	516	1506	83
10	13314	891	971	1863	79	486	1551	96
11	12359	955	907	1863	81	454	1598	109
12	11335	1024	839	1863	84	419	1646	118
13	10238	1097	765	1863	86	383	1695	130
14	9061	1176	686	1863	89	343	1746	138
15	7801	1261	602	1863	91	301	1798	145
16	6449	1351	511	1863	94	256	1852	152
17	5001	1449	414	1863	97	207	1908	155
18	3448	1553	310	1863	100	155	1965	157
19	1784	1664	198	1863	103	99	2024	158
20	0	1784	79	1863	106	39	2084	154
Sum								1711

Nogle af låneomkostningerne skal udbetales ved oprettelse af lånet (oprettelsesomkostninger), andre falder jævnt hen over løbetiden (løbende omkostninger). Låneomkostningerne skal udbetales ved oprettelsen af lånet, derfor skal det samlede lånebeløb forøges med disse oprettelsesomkostninger. Oprettelsesomkostningerne er sat til et fast beløb på

2000 kr. plus 1% af anlægsinvesteringen (178 kr.). Hovedstolen på lånet bliver hermed 19.966 kr.

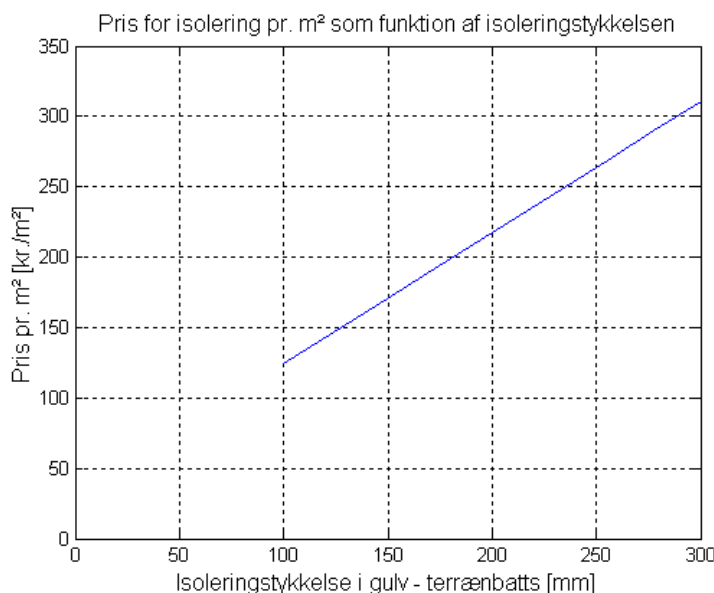
Som grundlag for finansiering af den samlede investering på 28781 kr. er der benyttet en rentefod på 7 %, en almindelig inflation på 3 %, en energiprisinflation på 3 % og en skatteprocent på 50 %.

Driftsomkostningerne er sat til en procentvis omkostning på $\frac{1}{2}$ %.

Lager og ekstra solfanger areal har en pris pr m^2 som er 17782 kr. / 129m^2 altså 138.00 kr

Skal der tilsvarende spares på opvarmningsbehovet ved at isolere gulvet yderligere i stedet for at benytte varmelager har vi ved samme økonomiske vilkår et rådigheds beløb til anlægsudgifter af ekstra isolering på 138,00 kr/ m^2 .

Det skal understreges, at den økonomiske vurdering der er foretaget her, vil kunne give en bedre rentabilitet hvis der foretages en zoneinddeling af slangerne i gulvet, og/eller et andet udlægningsprincip hvor der fx ikke lægges slanger under hele huset men kun under enkelte rum (fx de flisebelagte). Dette er dog ikke undersøgt her.



Figur 6.1 Priser ekstrapoleret ud fra værdier for mineraluld at levere og indstøbe taget fra [V&S] side 229. Ligningen fundet til $y=0,9316x+31,05$

For denne pris kan der som det ses i figur 6.1 købes et ekstra isoleringslag med en tykkelse på 115 mm for, hvis en sådan tykkelse fandtes på markedet. Hvad vil denne ekstra tykkelse give i reduktion af opvarmningsbehovet?

I tabel 4.2 er der foretaget beregninge med lageret inaktivt. I skemaet ses for type c-4 at varmetab til jord er 1951 kWh. Medtages varmetab gennem fundament er varmetabet gennem gulv 2481 kWh.

Såfremt varmetabet gennem gulv reduceres forholdsmæssigt med den øgede isoleringstykkelse, vil en øgning fra 300 mm isolering til 415 mm isolering, sænkes varmetabet til 72 % af det varmetab der er beregnet i tabel 4.2. Medtages kun varmetabet gennem jord, er besparelsen på 550 kWh/år. Medtages randtabet gennem

fundament også, reduceres med samme procentvise besparelse, bliver reduktionen på 700 kWh/år. Virkeligheden vil ligge imellem disse to antagelser.

Varmelageret som giver en reduktion i opvarmningsbehov på 1246 kWh, har altså en betydelig større indflydelse, end hvad der er gældende for ekstra isolering af terrændækket, også selv om man ikke tager dækningsbidraget til varmt brugsvand med.

Isoleringen vil givetvis kunne gøre bedre nytte andre steder i klimaskærmen, men i forbindelse med skærpelsen i år 2005 af bygningsreglementet, kan der blive tale om nødvendigheden af at reducere varmetabet for alle dele af klimaskærmen.

Solvarme, ikke bare til opvarmning af brugsvand, men også til reduktion af bygningens opvarmningsbehov, er derfor blandt de løsninger som skal medvirke til opfyldelse af energimålsætningen for nybyggeri fremsat i Energi 21 [Energi21].

7 Diskussion og konklusion

I denne rapport er der lavet undersøgelser af varmelagring af solvarme i terrændæk. Undersøgelsen tager udgangspunkt i detaljerede beregninger i en model opbygget i Matlab og Simulink, samt det her til knyttede finite element program Femlab.

7.1 Opbygning af model

Der er i dette arbejde opbygget en model af et hus med varmelagring af solvarme i terrændæk. Modellen for huset indeholder en detaljeret beskrivelse af de termiske og varmetekniske forhold i vægge, vinduer, loft og gulv.

Modellen baserer sig på en såkaldt RC-model, der er opbygget af en række knudepunkter med varmekapacitet tilknyttet. Mellem knudepunkterne er der varmemodstande. Denne model er generelt velafprøvet, og giver troværdige resultater.

I gulvet benyttes der ligeledes en RC-model for beregningerne. Det var indledningsvis ønsket at benytte en todimensional finite element metode, til bestemmelse af temperaturforholdene i gulvet. Dette selvfølgelig på grund af gulvvarmeslangerne. Det viste sig dog, at denne fremgangsmåde gav meget lange beregningstider, der umuliggjorde parametervariationer. I stedet blev der derfor udviklet en metode til at bestemme parametre for varmemodstande og varmkapaciteter i en RC-model, på baggrund af en finite element beregning. Ved beregning er det eftervist, at de to metoder ikke afviger nævneværdigt fra hinanden.

Modellen for solfangeren er opbygget på baggrund af effektivitetsudtrykket for solfangeren. Derudover er der opbygget model af en soltank, baseret på en treknudemodel, hvor der bliver beregnet temperaturer tre steder i tanken.

Hele modellen er opbygget i Matlab og Simulink, med den statiske initialisering i Matlab og med de dynamiske beregninger i Simulink.

Generelt er det fundet, at modellens resultater er troværdige, og kan benyttes til den videre resultatanalyse.

Den opbyggede model er meget kompleks, og kræver både et stort generelt kendskab til Matlab, Simulink og finite element programmet Femlab, samt til den opbyggede model. Modellen er derfor ikke umiddelbart anvendelig. For at blive det, skal der udvikles en brugerflade og foretages en optimering af programmet, så beregningstiden kan nedsættes.

I stedet er der foretaget parametervariationer i modellen, som har givet anledning til nogle dimensioneringsdiagrammer, som kan benyttes til at finde den opnåede reduktion i opvarmningsbehov, som funktion af solfangerarealet og de gulvkonstruktioner der er undersøgt.

7.2 Overordnede resultater

Lageret der undersøges i rapporten dækker hele husets grundareal. Opbygningen af lageret er valgt på grund af, at der opføres typehuse med en dobbelt terrændækskonstruktion. Konstruktionen er opbygget nedefra af et lag isolering, nedre betonlag, isolering og et øvre betonlag, hvor der udlægges gulvvarmeslanger. Her kan det nedre dæk passende benyttes til varmelagring, som udføres ved at der også udlægges et lag slanger her. Denne løsning vil være nem at indbygge i nye typehuse, idet der blot skal lægges et ekstra lag

slanger i det nedre dæk, der blandt andet også benyttes som understøtning for inder-vægge.

I beregningerne tages der udgangspunkt i et typisk dansk typehus fra firmaet Bülow og Nielsen. Huset har et grundplan på 130 m². Der udføres beregninger på to varianter af huset, hhv. med og uden varmegenvindingsenhed på husets ventilationsanlæg. Uden varmegenvinding er opvarmningsbehovet på omkring 9000 kWh om året, og huset lever op til det nuværende bygningsreglement. Med varmegenvinding falder opvarmningsbehovet til omkring 5000 kWh om året, og dermed vil huset kunne leve op til de krav der bliver stillet i det kommende bygningsreglement.

Indledningsvis kan det konstateres, at det er muligt at reducere opvarmningsbehovet ved at benytte et varmelager i terrændækket. Denne reduktion er fundet til at være af størrelsesordenen 60 til 130 kWh/(år m² solfanger), hvor den mindste reduktion opstår for huset med det i forvejen lave opvarmningsbehov. I undersøgelsen er der lavet beregninger med solfangerarealer op til 16 m². I afsnit 7.3 og 7.4 beskrives de resultater, der er opnået for forskellige opbygninger af lager og styring.

Energimæssigt er det fundet, at det nedsatte opvarmningsbehov kommer fra et væsentlig formindsket varmetab mod jord fra gulvvarmesystemet, idet det nedre dæk opvarmes. Derimod er varmetabet fra varmelageret mod jord og fundament meget stort, på grund af den forhøjede temperatur, hvilket betyder, at den tilførte varme, kun i et mindre omfang kommer huset til gode.

Der er ikke fundet grundlag for en aktiv overførsel af varme mellem lager og gulvvarmedæk ved den undersøgte konstruktionsopbygning, idet lagertemperaturen i fyringssæsonen ikke bliver høj nok, til at der kan hentes varme fra lageret og op i gulvvarmeslangerne.

7.3 Sammenligning med øvrige undersøgelser

Reduktionen i opvarmningsbehovet skal sammenholdes med tre øvrige undersøgelser.

I en indledende undersøgelse til dette projekt, som blev udført som et studenterprojekt på DTU af Thomas Bommersholdt og Mogens Holst, blev der fundet et potentiale for reduktion af opvarmningsbehovet på 130 kWh/m² for et hus med et opvarmningsbehov på omkring 4000 kWh om året. Det indledende bud kan altså konstateres som værende alt for højt, og skyldes i stort omfang et for optimistisk skøn for den aktive varmeoverførsel mellem lageret og gulvvarmelaget i den dobbelte terrændækskonstruktion. Derudover var beregningen baseret på meget simple overslagsberegninger, hvor der blandt andet ikke blev taget højde for temperaturudsving i rummet i huset.

I en anden undersøgelse, som også er udført på DTU af Alfred Heller med titlen ”Undersøgelse af solvarme med bygningsintegreret sandlager”, hvor der blev udført beregninger og målinger på et

650 mm sandlager, der lige som her var anbragt under hele husets grundplan. Det svarer til et samlet lagervolumen på 90 m³. Her blev der fundet et potentiale til besparelse af rumopvarmningen på op til 2300 kWh årligt ved et solfangerareal på 18 m², eller omkring 130 kWh/m². Solfangerarealet er større end det der er undersøgt i denne rapport. Det hus der undersøgt havde et opvarmningsbehov på omkring 6000 kWh årligt, ligeledes for et 130 m² hus. Det større potentiale der findes her, skyldes blandt andet, at solvarmen om muligt benyttes direkte i gulvvarmeslangen.

I en undersøgelse af solvarmelagre udført på Teknologisk Institut af Klaus Ellehauge et al med titlen: "Aktive solvarmeanlæg med større dækning af husets samlede opvarmningsbehov", er det fundet, at den optimale størrelse for et lager opnås for lagre, der har en ækvivalent varmekapacitet svarende til 50 til 100 l vand pr. m² solfanger. Dette vil overslagsmæssigt svare til et lager på 2 m³ beton, ved et solfangerareal på 8 m². I den undersøgelse der er foretaget i denne rapport, er der et volumen på mellem 13 og 39 m³, hvilket er væsentligt større end anbefalet i kilden. Størrelsen af lageret er i denne rapport givet ud fra en nødvendig tykkelse af betondækket, som skal bære indervæggene. Forskellen mellem de to undersøgelser er endvidere, at i kilden er der aktiv udnyttelse af varmelagringen, hvorimod der i denne rapport kun kigges på passiv udnyttelse.

Samlet kan det siges, at resultaterne fra denne undersøgelse underbygger de resultater der tidligere er fundet.

7.4 Lageropbygning

Som beskrevet indledningsvis i diskussionen, er der fundet et en reduktion på mellem 60 og 130 kWh pr. m² solfangerareal på opvarmningsbehovet i huset. Reduktionen er mindst for huset med varmegenvinding, som kan leve op til de krav der vil blive stillet i det bygningsreglement der kommer i år 2005. Tilsvarende er der en større reduktion for huset med større opvarmningsbehov.

Der er i de udførte beregninger taget udgangspunkt i en række forskellige terrændækskonstruktioner. Fælles for dem alle er, at der er en total isoleringstykkelse på 300 mm, samt et øvre betondæk på 100 mm hvor gulvvarmeslangerne er indstøbt. I beregningerne er der således varieret på følgende størrelser: Fordeling af den samlede isoleringstykkelsen, hhv. mellem de to dæk og under nedre dæk. Lagertykkelsen blev varieret mellem 100 mm og 300 mm, og var typisk udført i beton – dog benyttedes der i én af beregningerne sand som varmelagrende medium. Generelt benyttedes en rørafstand på 300 mm, men i en enkelt af beregningerne benyttedes 500 mm. Samlet blev der lavet beregninger på syv forskellige gulvopbygninger.

Indledningsvis kan det konstateres, at en lagertykkelse på 100 mm i alle tilfælde er tilstrækkelig, til at lagre den fra solfangeren afgivne varme. Dette kan ses ud fra reduktionen af opvarmningsbehovet, der ikke ændres ved forskellige lagertykkelser. Der er derfor ingen grund til at benytte en lagertykkelse på over 100 mm – mindre kunne måske endda være nok. Dette er dog ikke undersøgt.

Rørafstanden er heller ikke af væsentlig betydning for lagerets egenskaber. Derfor kan det anbefales at benytte en rørafstand på 500 mm i varmelageret. I gulvvarmedækket vil det muligvis give problemer med at tilføre nok varme til rummet, samt problemer med store temperaturforskelle på gulvoverfladen hhv. lige over et rør og midt mellem to rør.

Der er heller ikke forskel på den opnåede reduktion af opvarmningsbehovet afhængig af, om der benyttes sand eller beton som lager.

Derimod er der en væsentlig forskel på ydelsen af lageret i form af en reduktion af opvarmningsbehovet, afhængig af fordelingen af isoleringen mellem de to dæk i gulvkonstruktionen. Generelt kan det siges, at jo mindre isoleringstykkelsen er mellem de to dæk, jo større ydelse vil der være.

Her skal det dog nævnes, at en mindre isoleringstykkelse vil give højere overfladetemperaturer på gulvet, og dermed en større varmeafgivelse til rummet, som om sommeren

giver anledning til problemer med for høje temperaturer i rumluften og på gulvoverfladerne.

Man skal derfor være opmærksom på, at en lille isoleringstykkelse medfører nogle styringsmæssige krav. For eksempel kunne det være en ide at undgå at opvarme lageret til over en vis temperatur om sommeren (fx 30-35 °C).

7.5 Styring

De ovenfor omtalte resultater gælder for et anlæg, hvor al den varme der optages i solfangeren, lagres i lageret i gulvet. Der er også undersøgt forskellige styringer af anlægget, hvor varmen afhængig af temperaturforholdene, sendes enten i soltank eller i lager.

Det kan konstateres, at ved at udnytte muligheden for lagring af varme i terrændækket, kan solfangeren bringes til at yde væsentlig mere. Desværre går en meget stor del af denne ekstra ydelse tabt, på grund af et stærkt forøget varmetab mod jord, hvilket er beskrevet i forrige afsnit.

Det har dog været svært at få implementeret styringer der har virket tilfredsstillende i modellen, hvilket betyder, at der ikke er gjort meget ud af styringens indflydelse på anlæggets ydelse her.

Ud fra kortere simuleringer med forskellige styringsstrategier, kan det konstateres at, at der vil være muligheder for større reduktioner ved en intelligent udnyttelse af den varme, som solfangeren kan levere.

En god styring til anlægget skal sørge for, at så meget varme som muligt sendes til soltanken. Dette kan ses ud fra mængden af nyttiggjort varme, som er væsentlig højere for soltanken end i lageret. Er der overskydende varme skal den sendes i lageret. Det er blandt andet fundet at en seriel styring, hvor varmen først afsættes i tanken og dernæst i lageret, giver et større samlet udbytte end hvis varmen udelukkende sendes i soltanken.

Samtidig skal styringen undgå at lageret bliver for varmt, hvilket giver problemer med for høje temperaturer på gulvoverflader og i rum, som igen fører til diskomfort.

7.6 Komfortvarme

I nye huse benyttes der i meget stort omfang gulvvarme. Gulvvarme giver en god fordeling af varme i rummene i huset, og giver en forøget følelse af komfort med det opvarmede gulv. Desværre er der på det seneste fremkommet resultater, som tyder på at et gulvvarmeanlæg giver anledning til større energiforbrug. Forholdene er undersøgt i en EFP-rapport foretaget på Teknologisk Institut. Her er en af de store syndere hvad angår det forøgede opvarmningsbehov et graddageuafhængigt forbrug, som blandt andet skyldes, at brugere i huse med gulvvarme, har tændt for anlægget om sommeren, for at få hævet temperaturen på klinkebelagte arealer, så de ikke føles kolde. I nye huse er der ofte store sammenhængende køkken/alrum med klinkebelægninger. Det forøgede opvarmningsbehov er endvidere ved at blive undersøgt i et igangværende EFP-projekt, der foretages på BYG-DTU om energirigtig gulvvarme.

Det er i rapporten fundet, at ved at benytte varmelagring i terrændækket, vil temperaturen på gulvoverfladen blive hævet, og dermed er det ikke nødvendigt, at have tændt for gulvvarmeanlægget om sommeren, for at få den ønskede komfort.

Der er ikke foretaget en vurdering af hvor stort et potentiale for besparelse dette medfører, blot konstateres det, at solvarme generelt vil være i stand til at løse denne problema-

tik, idet der om sommeren meget ofte er overskydende varme fra solfangeren, som ikke kan afsættes i soltanken, uden der kan opstå problemer med kogning.

En simple løsning på komfortvarmeproblemet kunne være, at cirkulere varme fra solfangeren direkte i gulvvarmeslangerne. Det er dog uden for formålet med denne rapport. Blot konstateres det, at det kunne være et interessant emne at arbejde videre med.

7.7 Økonomi

I rapporten er der lavet en beregning af økonomien for at udføre et varmelager. Det er fundet, at prisen for lageret er på ca. 138 kr./m². Inklusiv i prisen er også det ekstra solfangerareal, der sættes på taget oveni det allerede eksisterende solvarmeanlæg. Den ”rene” lagerpris er på ca. 45 kr./m². Prisen kan givetvis sænkes ved en anden udformning af lageret, uden at det vil ødelægge ydelsen af lageret.

Et lager som det ovenstående vil give en årlig reduktion i opvarmningsbehovet i huset på ca. 1300 kWh, eller en besparelse på ca. kr. 1.200, baseret på reduktionen for både rumopvarmning og varmt vand. Det vil give en tilbagebetalingstid på under 20 år, hvilket er et konservativt bud.

Hvad der gør varmelagring mere interessant i en økonomisk sammenhæng er, at hvis den fundne lagerpris sammenlignes med en forøget isoleringstykkelse, svarer det til en forøget isoleringstykkelse på ca. 115 mm. Eller en total tykkelse på 415 mm. Det er fundet, at denne forøgelse af isoleringstykkelsen kun vil forårsage en reduktion i opvarmningsbehovet på cirka 700 kWh, eller væsentlig mindre end den besparelse, der opnås med brug af et lager.

Det gør varmelageret interessant, set i lyset af de kommende stramninger i bygningsreglementet! En yderligere analyse af dette forhold, vil være yderst interessant.

7.8 Forslag til andre anlægsopbygninger

Det er fundet at valget af styring kan have en indflydelse på anlæggets ydelse og dermed rentabilitet. Derfor vil styringen ganske givet kunne hæve anlæggets samlede ydelse.

En anden mulighed kunne være at lave zoneinddelinger af lageret, så det ikke er hele lageret der varmes op, men kun dele heraf – fx under klinkebelagte rum, som vil give en forøget komfort, og samtidig sænke varmetabet mod jord fra gulvvarmeslangerne i disse rum.

Således vil et mindre, og bedre isoleret lager formentlig kunne give en bedre ydelse, idet der blandt andet ville være mulighed for en aktiv udnyttelse af varmen, på grund af det højere temperaturniveau. Det vil dog være uheldigt da der så kan komme områder i huset, hvor der vil komme en meget høj overfladetemperatur på gulvet i sommerperioden. Det vil en forbedret styringsstrategi der sætter en maksimal lagertemperatur dog kunne råde bod på, idet der således ikke vil kunne opstå komfortproblemer.

En konklusion der følger heraf er, at der formentlig kan drages fordel af muligheden for at udnytte solvarmen, til at give komfortvarme, ved at sende varme fra solfangeren direkte i gulvvarmekredsen.

7.9 Konklusion

Der er i dette projekt opbygget en beregningsmodel til undersøgelse af bygningsintegreret varmelagring af solvarme i terrændæk.

I rapporten er der foretaget undersøgelser af den mulige reduktion af opvarmningsbehovet til rumopvarmning i to huse der opfylder hhv. det nuværende og det kommende bygningsreglement.

Der er samlet fundet et potentiale for reduktion af rumopvarmningen på mellem 60 og 130 kWh pr. m² solfanger, afhængig af husets opvarmningsbehov, opbygning af terrændækskonstruktion, solfangerareal og styringsform.

Det fundne potentiale lægger sig op ad resultater fundet i øvrige rapporter.

Det er vist, at det opvarmede terrændæk kan eliminere brugen af gulvvarmeanlægget som komfortvarme om sommeren.

Samtidig er det fundet, at ved samme anlægspris vil et varmelager reducere opvarmningsbehovet i huset mere, end hvad der er tilfældet ved at forøge isoleringstykkelsen.

8 Litteratur

- [Bommersholdt og Holst] Bommersholdt, Thomas og Holst, Mogens: Lagring af varme i bygninger, Polyteknisk Midtvejsprojekt udført ved IBE, 1998
- [BRs98] Bolig- og Byministeriet: Bygningsreglement for småhuse, 1998. Kan hentes på www.bm.dk
- [Danvak] Hansen, H. E., Kjerulf-Jensen, P., Stampe, Ole, B.: Danvak grundbog, 2. Udgave
- [Dutr  ] Dutr  , Willy L: Simulation of Thermal Systems – a modular program with an interactive preprocessor (EMGP3), Kluwer academic publishers, 1991
- [Ellehauge] Ellehauge, Klaus et. al: Aktive solvarmeanlæg med større dækning af husets samlede opvarmningsbehov, 1999, Teknologisk Institut
- [Energi21] Energi 21 Regeringens energihandlingsplan. Miljø og energiministeriet, Energistyrelsen, 1996. Kan findes på www.ens.dk/e21/e21dk/index.htm
- [Femlab] Comsol. Her benyttes version 2.0 af programmet se. www.comsol.dk
- [Furbo] Furbo, Simon: Varmelagre til solvarmeanlæg. Notat U-002, 1997 IBE
- [Handyman] Priser fundet på hjemmesiden www.handyman.dk
- [Heat2] Blomberg, Thomas: Heat 2, version 5. Yderligere oplysninger kan hentes på www.blocon.se, eller www.blocon.com
- [Heller] Heller, Alfred: Undersøgelse af solvarme med bygningsintegreret sandlager, IBE, DTU, Rapport R-006, 1996
- [MathWorks] The MathWorks Inc., se www.mathworks.com, der benyttes version 6.0 og 4.0 af Simulink
- [Mills] Mills, Anthony F.: Heat Transfer, IRWIN, 1992
- [Noyé] Noyé, Peter: Modellering af vinduers energiforhold i bygninger. Eksamensprojekt udført ved IBE, marts 2000
- [Radisch] Vurdering af varmeforbrug i nyere huse med gulvvarme, Teknologisk Institut, 2001
- [Rahbek og Svendsen] Rahbek, Jens og Svendsen, Svend: Solsim. Simuleringsprogram for solvarmeanlæg. Meddelelse 273, 1995, Laboratoriet for Varmeisolering, DTU

-
- [Rose] Rose, Jørgen: Typehus svarende til BR-2005-Energikrav Del 1: optimering af konstruktioner/systemer. Rapport R-050, 2001, BYG·DTU
- [Rose2] Rose, Jørgen: Kuldebroer i klimaskærmskonstruktioner – målt og beregnet, R-033, ph.d. projekt udført ved IBE, 1999
- [Soldia] Rafnsson, Rafn: Modellering, beregning af bygningers indeklimate og energibehov. Herunder: Soldia. Program til beregning af solindstråling og optegning af soldigrammer, IBE, 1997
- [Veksler] Computerprogram udviklet ved Laboratoriet for Varmeisolering. Se fx [Furbo] for dokumentation af program
- [V&S] V&S-priser. Husbygning-brutto, 2001. V&S Byggedata A/S

Bilag 1 Beskrivelse af Matlab/Simulink/Femlab

Ovenstående opstillede model skal implementeres i Matlab/Simulink/Femlab miljøet, hvorfor der her gives en kort introduktion til miljøet.

Matlab-Simulink miljøet er udviklet af ”The MathWorks inc.”. Bedst kendt er Matlab som er velfunderet og bredt anvendt indenfor matematik, hvor det anvendes til integration, dataanalyse, matrixberegninger, modellering, visualiseringer og meget andet.

Matlab brugerfladen (Workspace) giver brugeren mulighed for, at arbejde med variable, importere og eksportere data, samt at foretage en række matematiske manipulationer med disse. Via programmering i Matlabs eget programmeringsmiljø, er det muligt at konstruere større programmer med brug af indbyggede matematik- og matrixfunktioner, input- og outputdata fra Matlab brugerfladen, samt objektorienterede programmerings-elementer.

Det er desuden muligt at implementere elementer fra C/C++ og Fortran i Matlab.

Simulink er et tillæg til Matlab, som er et interaktivt programmeringsmiljø til modellering og simulering af dynamiske miljøer. Simulink understøtter både lineære og ulineære systemer.

Simulink er fuldt grafisk baseret. Programmet tillader brugeren at modellere systemer vha. blokdiagrammer. Til modelleringen baserer Simulink sig på et omfattende bibliotek af allerede eksisterende blokke med kontinuerte, diskrete, lineære og ulineære funktioner, input- og outputmuligheder samt forskellige datatransportmuligheder. Modelleringen i Simulink kan udbygges med brugerspecificerede blokke, der eksempelvis kan være programmeret i Matlab programmeringsmiljøet.

Modeller i Simulink kan valgfrit opdeles i undersystemer, hvilket øger overskueligheden, og dele af modellen kan udstyres med brugerfladeelementer til eksempelvis indtastning af inddata.

Simulink indeholder en række avancerede løsningsalgoritmer til beregninger på opstillede modeller. Løsningsalgoritmerne omfatter metoder baseret på såvel faste som variable tidskridt. Grafer og displays placeret valgfrit i modellen, giver brugeren mulighed for at følge og opsamle alle ønskede værdier under simuleringen. Under simuleringen er det endvidere muligt at variere inddataværdier, for ”øjeblikkeligt” at kunne undersøge enkelte parametres indflydelse.

Integrationen mellem Matlab og Simulink er høj, og med meget få undtagelser er det muligt frit at overføre data mellem de to. Således er det muligt, at kombinere Matlabs evne til at håndtere databehandling og komplekse beregninger, med Simulinks evne til at opbygge og foretage dynamiske beregninger på komplicerede modeller.

I Matlab og Simulink er det muligt at opbygge avancerede grafiske brugerflader: ”Graphical User Interface” (GUI).

Femlab som er udviklet af Comsol, er en tilføjelse til Matlab/Simulink. Femlab er specielt udviklet til finite element beregninger, og eksempelvis anvendelig på 2D transiente varmelednings og akkumuleringsproblemer. I Femlab baseres finite element beregningerne på en optegning af den ønskede 2 dimensionale geometri, hvorefter denne påtrykkes en række initialdata, samt randbetingelser. Femlab beregninger kan implementeres direkte i Matlab/Simulink miljøet, således at eksempelvis randbetingelserne anvendes som inddata til Femlab modellen fra Simulink.

I Matlab/Simulink er der allerede udviklet og implementeret modelleringsværktøjet ”MOWE”. Med implementeringen af den i rapporten opsatte model for bygningsintegreret varmelagring af solvarme i terrændæk i samme miljø, er det muligt at anvende MOWEs elementer til modellering af det øvrige rum, temperaturniveau og energiforbrug.